Untersuchung magnetischer Strukturen im Kerr - Mikroskop mit Hilfe eines digitalen Bildverarbeitungssystems

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen - Nürnberg

zur Erlangung des Grades
DOKTOR - INGENIEUR

vorgelegt
von
Friedrich G. Schmidt

Erlangen, 1986

1986 № 160

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41538114_0014

Untersuchung magnetischer Strukturen im Kerr-Mikroskop mit Hilfe eines digitalen Bildverarbeitungssystems

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Grades

DOKTOR - INGENIEUR

vorgelegt
von

Friedrich G. Schmidt

Erlangen, 1986

Als Dissertation genehmigt von der
Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	6.2.1986
Tag der Promotion:	13.3.1986
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. H. Brand
Berichterstatter:	Prof. Dr. A. Hubert
	Prof. Dr. G. Tomandl

Gliederung Seite

Einführung 1

I. Beobachtung magnetischer Domänen mit magnetooptischen Methoden 3

I.1 Beobachtungsmethoden magnetischer Domänen 3

I.2 Theorie des Kerr- bzw. Faraday-Effekts 5

I.3 Die Technik der magnetooptischen Effekte 7

I.4 Möglichkeiten und Grenzen der konventionellen Kerr-Technik 11

II. Möglichkeiten der Verstärkung des Kerr-Kontrasts durch elektronische Bildverarbeitung 14

II.1 Differenzbildverarbeitung 14

II.1.1 Die Idee 14

II.1.2 Das Prinzip der Differenzbildverarbeitung 15

II.2 Theorie der Rauschminderung 16

II.2.1 Mittelungsverfahren 16

II.2.2 Rauschminderung 19

II.2.3 Ergebnisse der Rauschsimulation 21

II.2.3.1 Art der Rundung 21

II.2.3.2 Speichertiefe 23

II.2.3.3 A/D-Wandler-Tiefe 25

III. Realisierung der Gesamteinheit Kerr-Mikroskop/ Bildverarbeitungssystem 28

III.1 Die Fernsehkamera 28

III.2 Das Bildverarbeitungssystem 30

III.3 Das Bedienpult 36

III.4 Stabilitätsanforderungen 37

III.5 Magnetisierungsstände 41

IV. Analyse des Systems 45

IV.1 Rauschmessung 45

IV.1.1 Das Meßverfahren 45

IV.1.2 Ergebnisse der Rauschmessung 47

IV.2 Referenzbildmöglichkeiten 50

IV.2.1 Differenzbildung durch Verändern der Polarisatorstellung 50

IV.2.2 Wechselfeld-Referenzbild 52

IV.2.3 Domänen-Differenzbild 52

IV.3 Grenzen und Möglichkeiten des Systems 53

IV.3.1 Auflösungsvermögen 53

IV.3.2 Störungen des Kerr-Effekts 58

V. Beispiele für die Leistungsfähigkeit des Systems 61

V.1 Magnetisierungsstrukturen von Siliziumeisen-Proben 61

V.2 Domänen auf verschiedenen nickelhaltigen Proben 63

V.3 Untersuchung von Kobalteisen 68

V.4 Amorphe metallische Legierungen 68

V.5 Verarbeitung des digitalen Bildinhalts im Computer 70

VI. Untersuchungen an CoCr-Schichten 72

VI.1 Einführung 72

VI.2 Problemstellung 73

VI.3 Die zu erwartenden Magnetisierungsprozesse 75

VI.4 Versuchsdurchführung 76

VI.5 Ergebnisse der Domänenbeobachtung 77

VI.6 Quantitative Auswertung der Domänenstrukturen 85

VI.7 Magnetooptische Aufzeichnungsschichten 91

VII. Zusammenfassung 95

VIII. Literaturverzeichnis 96

Einführung

Die Beobachtung magnetischer Strukturen mit magnetooptischen Methoden erfordert glatte und in optischen Dimensionen relieffreie Probenoberflächen. Ist es nicht möglich, z.B. durch geeignete Politurbehandlungen eine solche Oberfläche zu erlangen, so überdecken die starken nicht-magnetischen Untergrundkontraste die schwachen Kontraste magnetischen Ursprungs, sodaß bisher eine magnetooptische Untersuchung bestimmter Materialien nicht erfolgreich war. Eine Politur der Oberfläche ist zudem vielfach unerwünscht, da dadurch die Probe verändert wird. Mit Hilfe einer Differenzbildverstärkung in einem digital arbeitenden Bildverarbeitungssystem sollen diese schwachen magnetischen Kontraste verstärkt werden. In dieser Arbeit wurde das Konzept für ein mit einem Differenzbildverarbeitungssystem gekoppeltes Kerr-Mikroskop mit Hilfe von Rechnersimulationen erarbeitet. Basierend auf dieser Studie wurde ein für die geplante Anwendung optimiertes Bildverarbeitungssystem bei einem Ingenieur-Büro in Auftrag gegeben. Nach der Lieferung wurde die Leistungsfähigkeit getestet, das System an den notwendigen Stellen verbessert und in ein Gesamtsystem integriert. In einer Vielzahl verschiedener Anwendungen konnte ein entscheidender Fortschritt im Vergleich zum bisherigen Stand der Technik nachgewiesen werden.

Das Arbeitsprinzip des Gesamtsystems ist in Abb. 1 dargestellt: die magnetischen Kontraste eines im Kerrmikroskop gewonnenen Bildes werden durch Elimination des nichtmagnetischen Untergrundes verstärkt und somit sichtbar gemacht. Ein als Referenz dienendes Bild (hier die Probe im gesättigten Zustand) wird von dem zu bearbeitenden Originalbild subtrahiert. Anschließend wird das im Differenzbild auftretende digitale Rauschen durch Mitteln verringert.

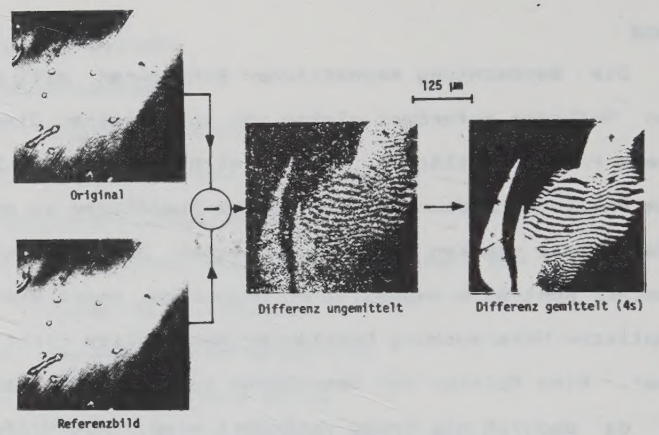


Abb. 1
Arbeitsweise des digitalen Bildverarbeitungssystems, demonstriert an einem eisenreichen metallischen Glas

In Kapitel I werden die magnetooptischen Verfahren der Domänenbeobachtung (Kerr- und Faraday-Effekt) vorgestellt. Im zweiten Abschnitt wird die elektronische Bildverarbeitung als Mittel zur Kontrastverstärkung diskutiert, woraus sich dann das Gesamtkonzept ergibt. Dessen Realisierung wird in Kap. III gezeigt. Anschließend wird die Leistungsfähigkeit des Systems ansatzweise durch Messungen mit den theoretisch ermittelten Grenzen und Möglichkeiten verglichen, wobei auch auf die verschiedenen Betriebsmoden eingegangen wird (Kap. IV). In Kap. V schließlich wird anhand konkreter Beispiele die Leistungsfähigkeit des Systems demonstriert. Als ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit werden dann in Kap. VI Untersuchungen an Medien vorgestellt, die für die senkrechte Aufzeichnung verwendet werden (CoCr-Schichten). In diesem Zusammenhang konnte die Frage nach der Art der in diesen Schichten ablaufenden Magnetisierungsprozesse mit Hilfe des Bildverarbeitungssystems erstmalig eindeutig geklärt werden.

I. Beobachtung magnetischer Domänen mit magnetooptischen Methoden

I.1 Beobachtungsmethoden magnetischer Domänen

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, magnetische Bereichsstrukturen zu untersuchen. Am besten bekannt sind die Bitter-Technik, die magnetooptische Betrachtung mit Hilfe des Kerr- und Faraday-Effekts sowie die Beobachtung im Elektronenmikroskop.

Zur Untersuchung magnetischer Domänen mit Hilfe der Bittertechnik verwendet man kolloidale Lösungen ca. 100 Å großer magnetischer Partikel, die auf die von Domänenstrukturen ausgehenden Streufelder empfindlich sind. Diese Methode zeichnet sich durch eine hohe Empfindlichkeit, die hauptsächlich durch die Teilchengröße gegeben ist, und einfache Handhabung aus. Eine Präparation der Oberfläche ist meistens nicht zwingend notwendig /1-3/. Es ist sogar möglich, Domänenstrukturen durch Schutzschichten hindurch zu beobachten /4,5/.

Diesen Vorteilen der Bitterstreifenmethode steht ein mangelndes dynamische Verhalten der Teilchen bei Magnetfeldänderungen sowie eine nicht unerhebliche Verschmutzung der Probenoberfläche gegenüber. Magnetische Bereichsstrukturen, die kein Streufeld aufweisen, können mit diesem Verfahren nicht beobachtet werden.

In den letzten Jahren gewinnt die Beobachtung magnetischer Strukturen im Raster-Elektronen-Mikroskop steigende Bedeutung vor allem aufgrund der Tatsache, daß die hochenergetischen Elektronen Verunreinigungen der Oberfläche und Deckschichten durchdringen können und so die zerstörungsfreie Untersuchung

magnetischer Strukturen in einigen µm Tiefe (>10µm) bei relativ geringem Präparationsaufwand /6-8/ ermöglichen. Ein weiterer Vorzug besteht darin, daß das gerasterte Bild auf elektronischem Wege leicht weiterverarbeitet werden kann (Kontrastverstärkung, Unterdrückung des Untergrunds).

Dem stehen wesentliche Nachteile dieses Verfahrens verglichen mit den anschließend diskutierten magnetooptischen Verfahren gegenüber. Dies sind die geringere Auflösung, die schwere Zugänglichkeit zur Probe und damit verbunden geringe Möglichkeiten zur Anwendung von Magnetfeldern und Temperaturbehandlungen sowie die sehr schwierige Beobachtung dynamischer Prozesse.

Die Beobachtung magnetischer Oberflächenstrukturen im polarisierten Licht beruht auf einer schwachen Wechselwirkung zwischen den optischen Konstanten und der Magnetisierungsrichtung /9,10/, dem Kerr- bzw dem Faradayeffekt. Anschaulich kann man die magnetooptischen Effekte so beschreiben, daß die Lorentz-Kraft auf die durch das Licht angeregten Elektronen des Materials wirkt und dadurch die Ebene eines linear polarisierten Lichtstrahls gedreht wird. Bei gekreuztem Polarisator und Analysator werden die Domänen als helle und dunkle Bereiche sichtbar.

Die magnetooptischen Methoden werden zur Untersuchung magnetischer Bereichsstrukturen sehr häufig verwendet. Die Ursache dafür liegt in der Vielzahl der Anwendungsmöglichkeiten (z.B. Untersuchung streufeldfreier Bereichsstrukturen oder von Domänen mit senkrecht oder parallel zur Probenoberfläche gerichteter Magnetisierung u.a. im selben Mikroskop) und weiteren wesentlichen Vorteilen: Die Domänenstruktur kann im Mikroskop direkt und eindeutig sichtbar gemacht werden, wobei dynamische Magnetisierungsvorgänge ohne besondere apparative Maßnahmen (im

Gegensatz zu den anderen o.a. Techniken) beobachtet werden können. Weiterhin ist die Probe während der Untersuchung leicht zugänglich, sodaß bei weitgehend beliebiger Probenform die Anwendung von hohen Magnetfeldern, Temperaturbehandlungen o.ä. möglich ist (im Gegensatz zur elektronenmikroskopischen Untersuchung). Das im Mikroskop gewonnene Bild kann mit Hilfe einer Fernsehkamera sehr einfach auf einem Monitor dargestellt bzw. zur Weiterverarbeitung weiter geleitet werden. Ersetzt man die Kamera durch einen Photomultiplier, so kann man durch direkte optische Messung lokale Magnetisierungskurven aufnehmen.

Das Verständnis des Faraday- und Kerr-Effekts ist im Rahmen des in dieser Arbeit beschriebenen Projekts sehr wichtig. Daher wird im folgenden etwas ausführlicher auf diese magnetooptischen Untersuchungsmethoden eingegangen.

I.2 Theorie des Kerr- bzw Faraday-Effekts

Beim Faraday-Effekt handelt es sich um die Wechselwirkung, die beim Durchgang des linear polarisierten Lichtstrahls durch ein optisch transparentes Medium (z.B. eine magnetische Granatschicht) auftritt, während man bei der Reflexion vom Kerr-Effekt spricht. Der allgemein schwächere Kerr-Effekt ist im Gegensatz zum stärkeren Faraday-Effekt also auf jedes magnetische Medium anwendbar. Man unterscheidet zwischen polarem, longitudinalem und transversalem Effekt (Abb. 2). Die Elektronen des Materials treten mit dem E-Vektor des linear polarisierten Licht in Wechselwirkung und werden zum Schwingen längs der Polarisationsrichtung angeregt. Zusätzlich zur regulären Komponente N des ausfallenden Lichts, die in derselben Polarisationsebene liegt, wird durch die Lorentzkraft eine schwache zusätzliche Komponente

$\underline{K}$ induziert, die senkrecht sowohl zur Magnetisierungsrichtung als auch zur Schwingungsebene des einfallenden Lichts orientiert ist (Abb. 2a). Steht die Schwingungsrichtung dieser Kerr-Komponente $\underline{K}$ senkrecht zur Richtung des reflektierten Strahls, so erhält man i.a. eine Drehung der Polarisationsebene des Lichts. Diese resultierende Drehung der Schwingungsebene des Lichts ist nach diesen Überlegungen von der Sättigungsmagnetisierung des Materials abhängig.

Beim polaren Effekt wird die stärkste magnetooptische Drehung bei senkrechtem Lichteinfall erreicht, während beim longitudinalen Effekt (Abb. 2b) der einfallende Strahl gegen die Oberfläche geneigt sein muß, da bei senkrechtem Einfall kein Effekt auftritt. Aus ähnlichen Überlegungen erkennt man, daß im Fall einer transversalen Orientierung (Abb. 2c) bei Transmission kein Effekt auftreten kann.

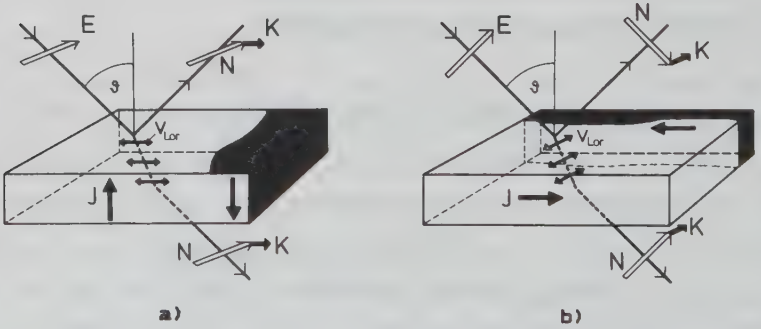
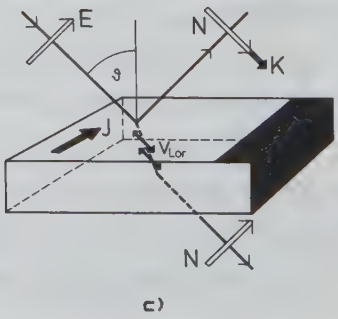


Abb. 2
Magnetooptische Effekte:
a) polar, b) longitudinal
und c) transversal
(nach A. Hubert /13/)



Da die Kerr-Amplitude im Vergleich zur normalreflektierten Intensität sehr klein ist ($K/N \approx 10^{-3}$), müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein, um diesen schwachen Effekt ausnutzen zu können. Neben einer hohe Lichtintensität und eines genau definierten, gebündelten Strahlengangs ist ein hoher Polarisationsgrad des einfallenden Lichts notwendig. Außerdem müssen depolarisierende Effekte aufgrund von Oberflächenunebenheiten weitestgehend vermieden werden. Rauhe Probenoberflächen stellen daher eine schwerwiegende Beeinträchtigung der Anwendbarkeit des Kerr-Effekts dar.

I.3 Die Technik der magnetooptischen Effekte

Die in diesem Abschnitt erwähnten entscheidenden Punkte der Technik der magnetooptischen Effekte sind seit etwa 25 Jahren wohl bekannt. Genauere Details sind bei Kranz und Hubert /11/ zu finden. Im folgenden will ich mich bei der Beschreibung auf den Kerr-Effekt beschränken, da er für die Untersuchungen in dieser Arbeit ausschließlich angewandt wurde. Die angeführten Punkte sind aber für den Faraday-Effekt ebenso gültig.

Der Aufbau eines Kerr-Mikroskops ist in Abb. 3 dargestellt. Es handelt sich um ein Polarisationsmikroskop, dessen Blenden und Linsen entsprechend dem Köhlerschen Beleuchtungsprinzip angeordnet sind. Zur Vermeidung von Depolarisationseffekten müssen die Objektivlinsen aus spannungsfreiem Glas hergestellt sein. Für die von uns geplanten Untersuchungen wählten wir ein Universal R Pol Mikroskop der Firma Zeiss, da es am leichtesten im Hinblick auf die im folgenden beschriebenen Anforderungen umzurüsten war.

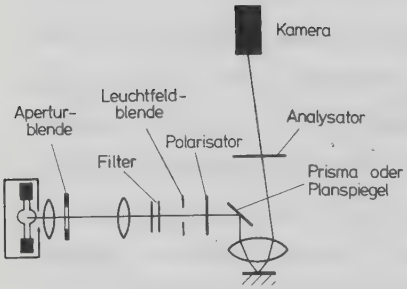


Abb. 3
Schematischer Aufbau eines Kerr-Mikroskops
(nach A. Hubert /13/)

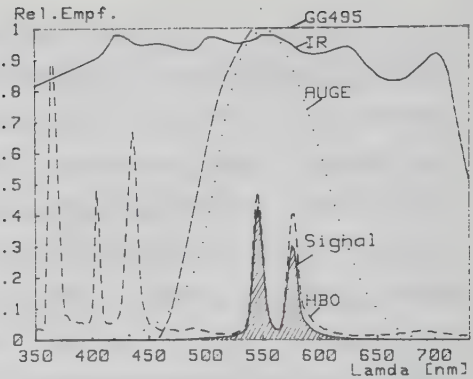


Abb. 4
Resultierendes Beleuchtungsspektrum (≙Signal) der HBO-Lampe bei Verwendung der angegebenen Filter (IR≙Wärmeschutzfilter, GG495≙ Gelbfilter) bezogen auf die Augenempfindlichkeit. Die Korrektur aufgrund der Verwendung von 3 IR-Filtern wurde dabei berücksichtigt.

Als Lichtquelle dient eine Quecksilber-Höchstdrucklampe HBO 100 W/2, deren hohe Leuchtdichte zum Erreichen guter Kontraste notwendig ist. Die Infrarotstrahlung wird mit Hilfe von mindestens 3 Wärmeschutz-Reflexionsfiltern "115 Tempax" der Fa. Schott unmittelbar hinter der Lichtquelle abgefangen, um eine Störung der Kameraröhre (Newvikon), die im Bereich des nahen Infrarot ihr Empfindlichkeitsmaximum hat, zu verhindern. Außerdem wird dadurch sichergestellt, daß eine Beeinflussung der Probe durch Erhitzen so weit wie möglich vermieden wird. Die 546 nm- und die 578 nm-Linie des HBO-Spektrums werden mittels eines zusätzlichen gelben Kantenfilters Schott GG495 entsprechend Abb. 4 herausgefiltert, da sie im Empfindlichkeitsmaximum des Auges liegen. Als Polarisatoren kann man entweder Folienpolarisatoren KS MIK der Fa. Käsemann verwenden oder Polarisationsprismen. Erstere weisen einen ausreichenden Polarisationsgrad von $2 \cdot 10^{-6}$ bei geringem Platzbedarf auf. Allerdings absorbieren sie in Durchlaßrichtung noch

mehr als 50% des Lichts, sodaß die Verwendung eines Polarisationsprismas einen Helligkeitsgewinn um den Faktor 2 bis 3 bringt, was bei der Untersuchung der feinen Strukturen von CoCr (Kap. VI) wichtig ist.

Der erreichbare Kontrast im Kerr-Mikroskop hängt entscheidend davon ab, wie stark die Untergrundintensität vermindert werden kann. Sie wird vor allem durch Oberflächenunebenheiten (dazu später) und durch das endliche Beleuchtungsbündel erzeugt. Das wesentliche am Köhlerschen Strahlengang ist die in die hintere Brennebene des Objektivs abgebildete Aperturblende. Da für alle außerhalb der Mittelebene liegenden Lichtstrahlen (Abb. 5, Lichtstrahl 2) die Auslöschungsbedingung der gekreuzten Polarisatoren nicht mehr optimal erfüllt ist, erhält man bei konoskopischer Betrachtung der gesamten Apertur ein Interferenzbild mit einer malteserkreuzförmigen Auslöschungszone (Abb. 5). Optimale Kontrastverhältnisse erhält man, wenn man den Beleuchtungsstrahlengang auf diese Auslöschungsgebiete beschränkt, sodaß z.B. alle Punkte des Gesichtsfeldes mit Strahlen beleuchtet werden, die näherungsweise in der gleichen Einfallsebene liegen.

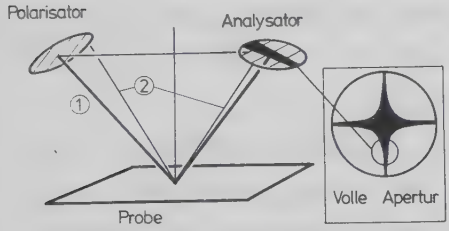


Abb. 5
Der Beleuchtungsstrahlengang von Polarisator zu Analysator und resultierendes Interferenzbild bei konoskopischer Betrachtung (nach A. Hubert /13/).

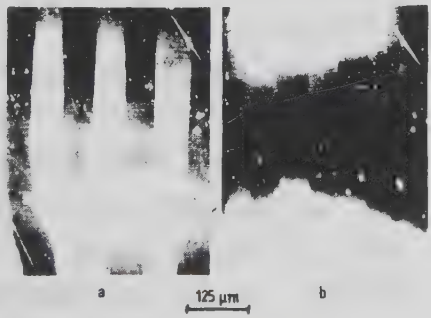


Abb. 6
Domänenbild eines FeSi-Blechs
a) bei optimal eingestellter und
b) bei verstellter Aperturblende.

Im Fall des polaren Kerr-Effekts verwendet man (bei senkrechter Inzidenz) eine kreisförmige Blende, während man bei longitudinaler bzw. transversaler Betrachtung eine Rechteckblende verwendet. Die Wichtigkeit der Kontrolle des Strahlengangs wird noch einmal in Abb. 6 demonstriert. Die Helligkeitsunterschiede der Abb. 6a bei optimal eingestellter Aperturblende werden durch Licht, das an Oberflächenunebenheiten gestreut wurde, verursacht und sind daher durch Bildverarbeitung zu beseitigen. Im Gegensatz dazu beruht die unterschiedliche Ausleuchtung bei verstellter Aperturblende auf oben beschriebenem Kontrastwechsel (Abb. 5), der nicht durch Bildverarbeitung beseitigt werden kann.

Das verwendete Standard-Mikroskop erfüllte diese Bedingung des genau kontrollierten Strahlengangs nicht. Die vorhandene, fest installierte und damit nicht justierbare kreisförmige Aperturblende wurde durch eine zusätzliche Spaltblende ergänzt. Durch eine verstellbare Linse, die zwischen Leuchtfeldblende und Aperturblende sitzt, ist es möglich, die Aperturblende in die Pupille des Objektivs abzubilden. Die sich für die verschiedenen Objektive ergebenden unterschiedlichen Positionen wurden mit Hilfe des o.a. Kontrast-Kriteriums (bei exakt gekreuzten Polarisatoren muß das gesamte Gesichtsfeld 'ausgelöscht' sein) bestimmt und entsprechende Lehren sowohl für den Prismen- als auch den Spiegelreflektor (s.u.) gefertigt.

Wie schon erwähnt, wählt man zur Beobachtung magnetischer Strukturen mit dem polaren Kerr-Effekt senkrechten Lichteinfall. Dazu wird zur Umlenkung des Lichtstrahls ein halbdurchlässiger planarer Spiegel (Abb. 7a) verwendet. In diesem Fall ist die gesamte Objektivapertur, die ja das Auflösungsvermögen bestimmt, ausnutzbar. In den beiden anderen Fällen wird als Umlenkeinheit ein Prisma eingesetzt (Abb. 7b), das die nötige schiefe Beleuchtung unter Winkeln, die durch die Objektivapertur gegeben

sind, erlaubt. Das Auflösungsvermögen ist in diesem Fall längs der Mikroskopachse voll, quer dazu aber nur halb ausnutzbar.

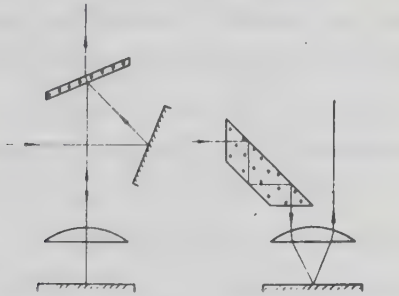


Abb. 7
Verwendete Reflektorentypen: halbdurchlässiger Planspiegel und Prisma
(aus "Einführung in die Auflichtmikroskopie", Zeiss)

Eine weitere Möglichkeit, den Kontrast durch Verringern der Untergrundintensität zu verbessern, ist das Bedampfen der Probenoberfläche mit eine $\lambda/4$-Interferenzschicht /11,12/. Diese dielektrische Schicht (für Metalle verwendet man z.B. ZnS) bewirkt eine Verringerung des normal reflektierten Lichts bei gleichzeitiger Verstärkung der Kerr-Komponente. Diese Belegung der Probenoberfläche wurde standardmäßig bei allen untersuchten Proben angewandt.

I.4 Möglichkeiten und Grenzen der konventionellen Kerr-Technik

Da die Größe der Drehung der Polarisationsebene des Lichts und damit die Stärke des magnetischen Kontrasts von der Sättigungsmagnetisierung des Materials abhängen, war bisher nur die Untersuchung stark magnetischer Materialien sinnvoll möglich. Diese schwachen magnetischen Kontraste werden häufig noch durch die stärkeren Kontraste einer gestörten Oberfläche überdeckt. Aus diesem Grund waren die magnetischen Bereiche vieler in der Praxis eingesetzter Werkstoffe bisher unbekannt.

Zur Verdeutlichung der Aufgabenstellung zeigt die Abb. 2 Aufnahmen eines FeSi-Transformatoren-Blechs mit Goss-Textur (8a) und eines magnetostriktionsfreien metallischen Glases (8b,c). Im Fall (8a) ist der magnetische Kontrast aufgrund der hohen Sättigungsmagnetisierung von etwa 2 Tesla gut. Die Domänenstruktur ist im Kerr-Mikroskop trotz störender Spuren von Oberflächenstrukturen deutlich sichtbar. Im Fall der amorphen Legierung (VITROVAC 6030) beträgt die Sättigungspolarisation aufgrund des hohen Cobaltgehalts von ca. 70 % nur etwa 0.7T. Die dadurch bedingten schwachen magnetischen Kontraste werden nun noch zusätzlich durch die starken Kontraste der unbehandelten und daher erheblich gestörten Oberfläche der Probe überdeckt. Im remanenten Zustand (8c) sind nur andeutungsweise eine Domänenwand und ein einige Domänen zu erkennen. Zum Vergleich zeigt Abb. 8b den gesättigten Zustand der Probe.

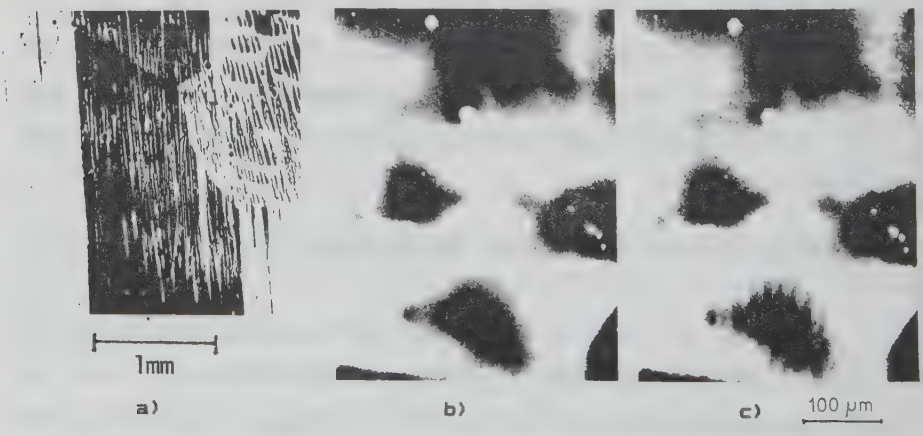


Abb. 8
a) Domänenstruktur eines FeSi-Blechs (ca. 3 % Si);
b)+c) Magnetostriktionsfreie amorphe Legierung (VITROVAC 6030, VAC Hanau, 40 µm Dicke):
b) im gesättigten Zustand, c) im remanenten Zustand

Die Verstärkung dieser schwachen magnetischen Kontraste soll mit Hilfe eines Bildverarbeitungssystems erfolgen, gleich-

zeitig sollen die von der Oberfläche verursachten Untergrundkontraste so weit wie möglich unterdrückt werden. Die Wirkungsweise des Bildverarbeitungssystems wurde in Abb. 1 vorweggenommen. Die Anforderungen an solch ein digital arbeitendes System und das daraus resultierende Konzept sind in den folgenden Kapiteln beschrieben.

II. Möglichkeiten der Verstärkung des Kerr-Kontrasts durch elektronische Bildverarbeitung

II.1 Differenzbildverarbeitung

II.1.1 Die Idee

Fowler und Fryer /14,15/ hatten 1954 als erste die Idee, mit Hilfe eines Differenzverfahrens den magnetischen Kontrast zu erhöhen. Sie überlagerten das Negativ der Aufnahme des gesättigten Zustandes einer Probe ("Referenzbild") mit einer Aufnahme eines beliebigen anderen magnetischen Zustands und subtrahierten so den unmagnetischen Kontrast. Dieses Verfahren hatte jedoch nur begrenzten Erfolg aufgrund der Nichtlinearität und der geringen Reproduzierbarkeit des photographischen Prozesses.

Honda und Shirae /16/ verwendeten 1981 zur Beobachtung von Domänenstrukturen auf den nicht polierten Oberflächen amorpher magnetischer Materialien im Kerr-Mikroskop eine Einzeilen-CCD-Kamera, deren elektrische Signale mit Hilfe eines Mikro-Computers weiter verarbeitet wurden. Da sie aber nur eine Speicherzeile verwendeten, war dieses Konzept nur zur Untersuchung periodischer Magnetisierungsvorgänge geeignet.

Die digitale Bildverarbeitung ist schon lange in der Elektronenmikroskopie, wie oben bereits erwähnt, zum Erreichen kontrastreicher Bilder üblich. Seit einigen Jahren wird die Differenzbildverstärkung in der Medizin unter dem Begriff Computer-Angiographie /17/ in Verbindung mit einer Röntgenanlage zur Blutgefäßdarstellung verwendet. An solch einer Anlage, die bei der Medizinischen Technik der Siemens AG in Erlangen stand und deren Benutzung uns durch Dr. J. Haendle ermöglicht wurde, konnten erste Versuche an metallischen Gläsern durchgeführt wer-

den (s. Abb. 15). Als zerstörungsfreies Materialprüfungsverfahren wird seit einigen Jahren eine Echtzeit-Röntgentopographie-Anlage zur Verbesserung von Halbleiter-Grundmaterialien verwendet /18/, mit welcher sich diese unter Technologie-Prozeßbedingungen untersuchen lassen. Mit solch einer Anlage, die am Max-Planck-Institut in Stuttgart bei Prof. H. J. Queisser steht, konnten ebenfalls Vorversuche durchgeführt werden. Diese Anlage ist jedoch für für die Anwendung zur Domänenbeobachtung zu komplex.

Wie bisher beschrieben, bietet sich zur Kontrastverstärkung bei der Untersuchung mikromagnetischer Strukturen die Kombination eines Kerr-Mikroskops mit einem digitalen Differenzbildsystem an. Das Prinzip der elektronischen Differenzbildverarbeitung ist im Folgenden dargestellt.

II.1.2 Das Prinzip der Differenzbildverarbeitung

Die Wirkungsweise der Differenzbildverarbeitung wurde bereits in Abb. 1 in der Einführung demonstriert. Im Originalbild werden die schwachen magnetischen Kontraste des eisenreichen amorphen Metalls von den Kontrasten des stark gestörten Untergrunds überlagert. Die magnetischen Domänen sind nur schemenhaft zu erkennen. Der Untergrund wird nun eliminiert, indem ein Referenzzustand der Probe an derselben Stelle (Referenzbild) vom Originalbild subtrahiert wird. Als Ergebnis erhält man ein Bild der magnetischen Strukturen. Prinzipiell ist dieses Verfahren auf alle Werkstoffe anwendbar, bei denen sich die zu untersuchende Struktur in zwei verschiedenen Zuständen unterscheidet. Im Fall der Abb. 1 wird als Referenzbild der gesättigte Zustand der Probe gewählt, d.h. die Probe ist einheitlich magnetisiert und im Kerr-Mikroskop zeigt die Probe daher nur einen gleichmäßigen magneti-

schen Kontrast. Das Differenzbild ist zwar stark verrauscht, dennoch sind die magnetischen Strukturen deutlich zu erkennen, die unmagnetischen Kontraste werden fast vollständig beseitigt. Auf die Ursachen des Rauschens und die Rauschminderung durch Mittelung wird im nächsten Kapitel eingegangen.

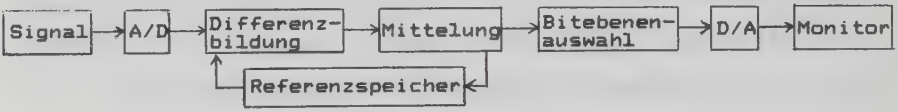


Abb. 9
Prinzipielles Schema der Bildverarbeitung

In Abb. 9 ist das prinzipielle Schema der digitalen Bildverarbeitung dargestellt. Das im Kerr-Mikroskop gewonnene Bild wird mit Hilfe einer Videokamera in ein analoges Signal verwandelt, das im Bildverarbeitungssystem mittels eines 8 Bit-Analog-Digital(A/D)-Wandlers in ein digitales Signal umgewandelt wird. Anschließend erfolgt die Mittelung zum Zweck der Rauschminderung. Das gemittelte Bild kann in einem Speicher abgelegt werden, wo es dann später zur Differenzbildung zur Verfügung steht. Aufgrund des Mittelungsprozesses steigt die Wertigkeit von den einkommenden 8 Bit an, sodaß bei hohen Mittelungszyklen ein 16 (bzw. 15) Bit-Speicher nötig ist (s. Kap. II.2) Das fertig verarbeitete Bild wird dann über einen 8 Bit-Digital-Analog(D/A)-Wandler in ein analoges Signal zurückgewandelt und auf einem Monitor dargestellt.

II.2 Theorie der Rauschminderung

II.2.1 Mittelungsverfahren

Das Rauschen eines Bildes soll durch Mitteln verringert werden. Prinzipiell könnte dies über eine Summation von Einzel-

bildern geschehen, wie es in Abb. 10 in Form der gestrichelten Linien angedeutet ist. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der maximal möglichen Rauschminderung.

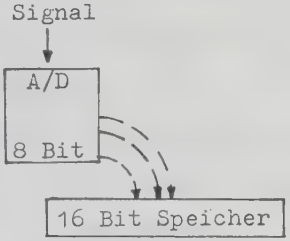


Abb. 10
Prinzip der "idealen Mittelung"

$S_i = S_{i-1} + B_i$ (I)

S_i: i-tes Speicherbild
B_i: i-tes Bild

Dieses Verfahren (I) weist jedoch zwei gravierende Nachteile auf:

a) Die Helligkeit nimmt während des Aufsummierens ständig zu

b) Der Speicherplatz ist im Fall eines 16 Bit Speichers auf $2^8 = 256$ Einzelbilder begrenzt.

Daher verwendet man heute meist folgendes rekursives Mittelungsverfahren mit konstanten Gewichtsfaktoren /16,17/:

$S_i = (1-1/N)\ S_{i-1} + (1/N)\ B_i$ (II)

N: vor Beginn der Mittelung einstellbares Gewicht der Form 2^m mit $0 < m < 8$

Der Vorteil dieses Verfahrens (II) liegt im geringeren Speicherbedarf. Es weist aber folgende gravierende Nachteile auf:

a) Aufgrund der konstanten Gewichtsfaktoren ist die Helligkeit am Anfang des Mittelungszyklus nicht konstant und nimmt mit zunehmender Mittelungsdauer zu.

b) Verglichen mit Verfahren I ist die Rauschminderung bei N Mittelungen deutlich schlechter, die maximale Rauschminderung wird erst ab ca. 3N Mittelungen erreicht.

c) Das dynamische Verhalten ist mangelhaft, da alle Teilbilder im sichtbaren Bild erhalten bleiben, allerdings mit

sinkendem Gewicht.

Die Rauschminderung wird dabei umso besser, je näher (1-1/N) bei 1 liegt. Damit nimmt aber auch die Einschwingdauer des Mittelungsvorgangs zu (siehe a).

Aus der Nachrichtentechnik ist das folgende rekursive Mittelungsverfahren mit dynamisch variablen Gewichtsfaktoren bekannt /19,20/.

N Schritte $\qquad\qquad$ G = 1 (Start)
i = 1,2,3,...,N

$$S_i = (1-1/G(i))\ S_{i-1} + (1/G(i))\ B_i \qquad \text{(III)}$$

G(i) berechnet sich dabei wie folgt:

G(1) = 1
G(i) = 2G(i-1), wenn i > A G(i-1)

G(i) nimmt fortschreitend Werte von Zweierpotenzen an. Die Einzelbilder erhalten effektiv etwas differierende Gewichte etwa zwischen 0.6/N und 1.4/N. Diese hängen auch von der Wahl des Faktors A ab, der durch Berechnung des statistischen Erwartungswerts optimiert werden kann: Es werden die Quadrate der Gewichte der Einzelbilder summiert, die sich aufgrund der obigen Rekursionsformel ergeben, und aus der Summe die Wurzel gezogen. Vergleicht man dieses Ergebnis mit den Werten für die ideale Mittelung $1/\sqrt{N}$ (alle Einzelbilder erhalten das gleiche Gewicht), so erhält man die Abweichung d des Wirkungsgrades von Verfahren III gegenüber dem idealen (I):

$$d = \sqrt{N/\sum_{i=1}^{N} G(i)^2}$$

Diese Abweichung d ist in der Tabelle A für einige Mittelungsstufen N in Abhängigkeit von A aufgeführt.

Tabelle A:
Abweichung d in Prozent der Wirkungsgrade der Verfahren III und I als Funktion von A für verschiedene Mittelungsstufen

N \ A=	1.200	1.300	1.350	1.375	1.400	1.500
16	3.044	2.032	2.032	2.033	2.033	3.471
64	3.128	2.274	2.180	2.092	2.092	2.722
256	3.211	2.270	2.102	2.070	2.074	2.465
1024	3.203	2.270	2.090	2.057	2.059	2.386

Es ergibt sich ein Optimum für A = 1.375 verbunden mit einer vernachlässigbaren Verschlechterung der Rauschminderung um ca. 2% gegenüber der idealen Mittelung.

Weitere Vorteile des rekursiven Verfahrens mit dynamischen Gewichtsfaktoren liegen in einer konstanten Helligkeit während des Mittelns, im optimalen dynamischen Verhalten und im geringen Speicherbedarf.

Im nächsten Kapitel wird auf die Rauschsimulation eingegangen, mit deren Hilfe die Bedingungen und Anforderungen für einen bestmöglichen Einsatz dieses Mittelungsverfahrens erarbeitet wurden.

II.2.2 Rauschminderung

Ursachen des Rauschens

Für das Rauschen eines Bildes sind zwei Quellen verantwortlich, deren Zusammenwirken das Gesamtrauschen bedingt:

- Das Eingangsrauschen des Fernsehsystems setzt sich aus dem statistischen Quantenrauschen des Lichts, welches bei

geringen Lichtstärken vorherrscht, und dem elektronischen Rauschen in der Eingangsstufe des Videoverstärkers der Fernsehkamera zusammen.

- Das A/D-Wandler-Rauschen wird durch die endlichen Diskretisierungsstufen des A/D-Wandlers verursacht (Digitalisierungsrauschen).

Eine Rauschminderung ist im letzteren Fall nur dann zu erreichen, wenn die Breite der Diskretisierungsstufen klein genug ist gegen die Amplitude des Grundrauschens. Die im A/D-Wandler auf diskrete Stufen gehobenen Punkte können beim Mitteln im Fall eines zu niedrigen Eingangsrauschens nicht mehr auf die ursprüngliche Position zurückversetzt werden. Es tritt demnach keine Verringerung des Eingangsrauschens auf. Dieser Fall tritt bei geringem Grundrauschen des Bildes verbunden mit einer hohen Mittelungszahl ein (siehe Kap. II.3).

Die Rauschsimulation

Die optimalen Systemparameter wurden nicht mit Hilfe einer nachrichtentechnischen Analyse des Mittelungsverfahrens (III), sondern durch Simulation der verschiedenen Systemparameter-Kombinationen im Computer bestimmt. Als Bildsignal wurde ein Helligkeitsgradient mit einem überlagerten Meßsignal von 0.2% angenommen (Abb. 11). In jedem Meßpunkt wurden N Meßwerte simuliert, die sich aus dem zugehörigen digitalisierten Signal und einem überlagerten Gaußschen Rauschen, das aus einer Zufallsfunktion abgeleitet wurde, zusammensetzen. Die Abweichungen des sich dabei ergebenden Mittelwertes vom Signal in diesem Meßpunkt werden quadriert und und über alle Meßpunkte summiert. Das durch radizieren der Summe ermittelte Ergebnisrauschen enthält sowohl das zeitliche Rauschen als auch Fluktuationen aufgrund nicht

ausgeglichener Digitalisierungsstufen.

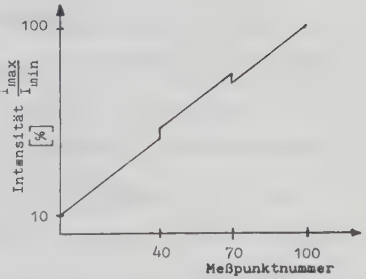


Abb. 11
Simuliertes Signal zur
Bestimmung des Rauschens

Im nächsten Kapitel sind die Anforderungen an ein digital arbeitendes Bildverarbeitungssystem verbunden mit den Leistungsmöglichkeiten und -grenzen dargelegt, die sich aus den Ergebnissen der Rauschsimulation ergeben.

II.2.3 Ergebnisse der Rauschsimulation

Bei der Rauschsimulation wurden die folgenden Parameter variiert:

- die Rundungsart
- das Grundrauschen
- die Mittelungstiefe N
- die A/D-Wandler-Tiefe
- die Speichertiefe.

II.2.3.1 Art der Rundung

Um eine hohe Genauigkeit der Mittelung zu gewährleisten, wird die Operation (III) auf 20 Bit genau gerechnet. Anschließend muß das Ergebnis der Mittelung entsprechend der verfügbaren Speicherkapazität gerundet werden. Es stehen drei verschiedene Rundungsverfahren zur Auswahl. Bei mathematischer Rundung wird die Zahl X ganzzahlig gerundet, indem man 1/2 addiert

und den nicht ganzzahligen Teil abschneidet (int(X+0.5)). Anstelle der 0.5 tritt bei statistischer Rundung eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 (int(X+rnd(0))). Wie aus Abb. 12 hervorgeht, arbeitet die dynamische Mittelung bei mathematischer Rundung nicht zufriedenstellend (durchgezogene Linie). Oberhalb 128 Mittelungen zeigen sich Anomalien im Kurvenverlauf, die bei statistischer Rundung nicht auftreten (gestrichelte Linie). Anscheinend bewirkt die mathematische Operation int(X+0.5), daß im Fall von hinreichend kleinen Faktoren 1/G(i) zu oft von $(1-1/G(i))S_{i-1}$ auf S_{i-1} aufgerundet wird.

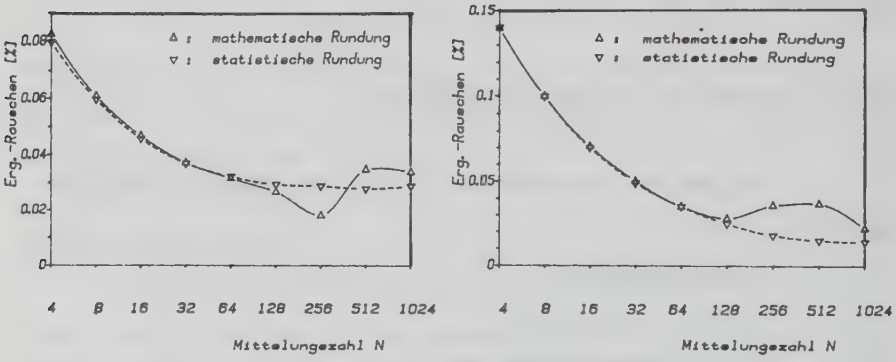


Abb. 12
Das Ergebnisrauschen als Funktion der Mittelungstiefe N für mathematische und statistische Rundung bei
a) 0.1% und b) 0.25% Grundrauschen. Es wurde ein 8 Bit A/D-Wandler und ein 16 Bit Speicher vorausgesetzt.

Realisiert wird die statistische Rundung durch Addition von Zufallsbits an den letzten Stellen des 20 Bit-Wortes, die oberhalb der maximalen Speicherwortlänge liegen (im Fall eines 16 Bit Speichers sind das die Stellen 17 bis 20), und anschließendes Abschneiden derselben.

In Abb. 13 wird eine zyklische Rundung mit den beiden vorne erwähnten Rundungsverfahren verglichen. Es wurde hier wie

in den späteren Beispielen eine etwas andere Darstellung gewählt. An der Ordinate ist der Kehrwert des Ergebnisrauschens aufgetragen, der direkt den Faktor der möglichen Rauschminderung wiedergibt.

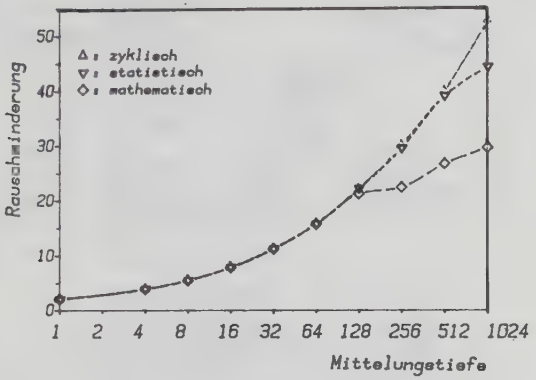


Abb. 13
Vergleich der Rauschminderung für zyklische, statistische und mathematische Rundung bei 0.5% Grundrauschen (8 Bit A/D-Wandler, 16 Bit Speicher).

Bei der zyklischen Rundung werden auf den letzten vier Stellen des 20-Bit-Wortes Werte von 0 bis 15 und dann wieder von 0 beginnend (mod(16)) addiert, bevor wieder nach dem 16. Bit abgeschnitten wird. Dieses Verfahren ist der statistischen Rundung offensichtlich ebenbürtig und hat darüberhinaus den Vorteil, daß es technisch erheblich einfacher zu realisieren ist: als zyklische Hilfsgrößen können die letzten vier Bit des Bildzählers verwendet werden.

II.2.3.2 Speichertiefe

Der Einfluß des zur Verfügung stehenden Speicherplatzes ist in Abb. 14 dargestellt. Es ist für verschiedene A/D-Wandler/Speicher-Variationen der Verlauf der Rauschminderung für fünf verschiedene Stärken des Grundrauschens (in jeweils einem Unterbild) aufgezeichnet.

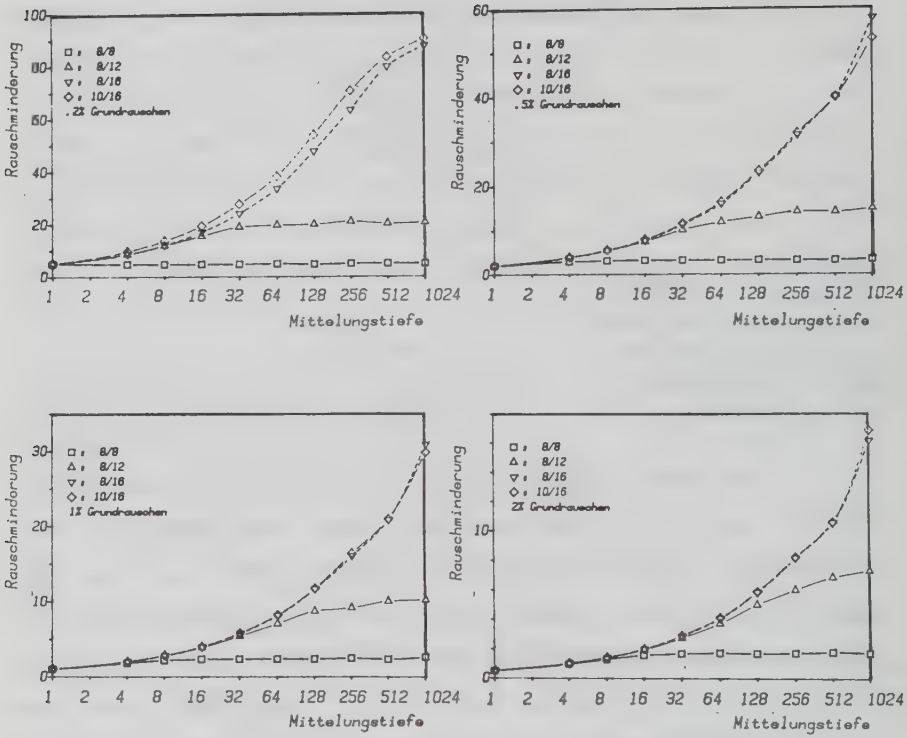


Abb. 14
Numerische Simulation für das Signal zu Rauschverhältnis in Abhängigkeit von der Mittelungstiefe N bei verschiedenen Stärken des Eingangsrauschens.

Wie sich schon nach Vorversuchen an einer Computerangiographie-Anlage (Siemens AG, UBMed Erlangen)mit einem 8 Bit Speicher herausstellte (s. Abb 15), ist im Fall eines 8 Bit Speichers nur eine geringfügige Rauschminderung möglich. Abb. 14 zeigt deutlich, daß ein 8 Bit Speicher überhaupt nur bei hohem Grundrauschen bis zur Mittelungstiefe N=4 sinnvoll zu nutzen ist. Etwas besser wird das Verhalten bei Verwendung eines 12 Bit Speichers. Allerdings werden die Meßwerte ab einer Mittelungstie-

fe von 32 zunehmend schlechter als im Fall eines 16 Bit Speichers, bei einer Mittelungstiefe von 1024 bereits um einen Faktor 2 bis 4, je nach Stärke des Eingangsrauschens.

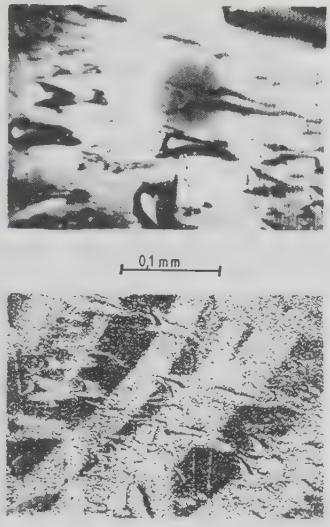


Abb. 15
Rückseite einer amorphen metallischen Legierung $Fe_{80}B_{14}Si_6$. Im Fall des kerr-optischen Originalbildes (a) sind allenfalls Spuren magnetischer Kontraste erkennbar. Das Differenzbild (b) zeigt deutlich die magnetischen Strukturen zusammen mit Resten der Oberflächenstruktur. Aufgrund des 8 Bit Speichers ist das Bild stark verrauscht. Diese Aufnahme wurde an der Computer-Angiographie-Anlage von Dr. J. Haendle, Siemens AG, gemacht (s. Kap. II.1.1)

In Abb. 14 nicht mehr dargestellt ist das Verhalten für einen 18 Bit Speicher. Die Verbesserung der Rauschminderung beträgt lediglich 3% bis 4%, was den erheblichen Kostenmehraufwand nicht rechtfertigt. Oberhalb 1024 Mittelungen wäre zwar theoretisch noch ein größerer Gewinn zu erzielen. Bei den Frequenzen der Videonorm (25 Vollbilder/Sekunde) und den sich daraus ergebenden Aufnahmezeiten von mehreren Minuten wäre dann das System aber aufgrund von Langzeitdrifterscheinungen nicht mehr sinnvoll einzusetzen.

II.2.3.3 A/D-Wandler-Tiefe

In den Graphiken der Abb. 14 ist zum Vergleich mit einem 8 Bit A/D-Wandler die erzielbare Rauschminderung für einen 10 Bit A/D-Wandler in Verbindung mit einem 16 Bit Speicher eben-

falls gezeigt. Das Verhalten des Ergebnisrauschens ist für 3 Mittelungsstufen in Abhängigkeit vom Eingangsrauschen für die beiden Fälle in Abb. 16 festgehalten.

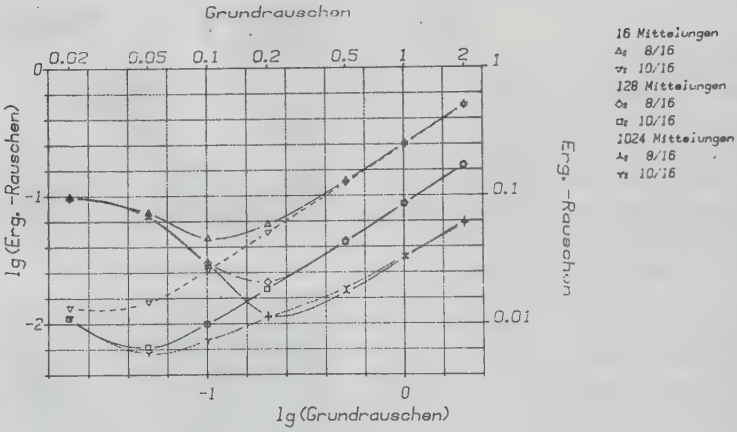


Abb. 16
Das Ergebnisrauschen als Funktion des Grundrauschens für 16, 128 und 1024 Mittelungen sowohl für einen 8 Bit als auch einen 10 Bit A/D-Wandler

Für alle Mittelungstiefen existiert ein Minimum der Rauschminderung. Bedingt durch die in Kap. II.2.2 erwähnten Digitalisierungseffekte steigt das Ergebnisrauschen bei zu niedrigen Werten des Eingangsrauschens wieder an. Das Minimum des Ergebnisrauschens verschiebt sich bei Verwendung eines 8 Bit A/D-Wandlers von 0.1% Grundrauschen bei 16 Mittelungen zu 0.2% Grundrauschen bei 1024 Mittelungen hin.

Weiterhin ist ersichtlich, daß das Minimum im Fall des 10 Bit A/D-Wandlers bei einem Grundrauschen von 0.07% deutlich niedriger liegt als im Fall des 8 Bit Wandlers mit 0.25% Grundrauschen.

Andererseits bringt der 10 Bit Wandler gegenüber dem 8 Bit Wandler erst unterhalb 0.2% Eingangsrauschen Vorteile. Für die Anwendung zur Beobachtung von Mikrostrukturen im Lichtmikro-

skop ist jedoch ein Grundrauschen oberhalb von 1% zu erwarten, was auch durch Rauschmessungen (s. Kap. V) bestätigt wird, d.h. ein 8 Bit A/D-Wandler ist völlig ausreichend.

Als Ergebnis der Rauschsimulation bleibt festzuhalten: Für die geplanten Anwendungen ist ein Bildverarbeitungssystem mit einem 8 Bit A/D-Wandler und einem 16 Bit Speicher am besten geeignet. Die Rechnung soll auf 20 Bit genau durchgeführt werden, da eine Rechengenauigkeit von 16 Bit bedeuten würde, daß der Überlauf einfach abgeschnitten wird, und da mit 17 Bit nur die ungenügende mathematische Rundung zu realisieren wäre. Die festgesetzten 20 Bit garantieren in jedem Fall eine ausreichende Genauigkeit der Mittelungsprozedur. Die Mittelung erfolgt rekursiv mit dynamisch variablen Gewichtsfaktoren, anschließend wird das Ergebnis mit zyklisch wechselnden Hilfsgrößen auf 16 Bit gerundet.

In dieser Ausstattung erhält man für ein realistisches Grundrauschen von 1% eine Kontraststeigerung ungefähr um den Faktor 30 bei 1024 Mittelungen, für ein Eingangsrauschen von 2% immerhin fast noch um den Faktor 20 (s. Abb. 14). Das bedeutet, daß Kontraste im Bereich unterhalb 0.05% sichtbar gemacht werden können (zum Vergleich: das menschliche Auge ist bestenfalls in der Lage, Kontraste von wenigen Prozent zu erkennen).

Die unmittelbare Beobachtung dynamischer Magnetisierungsprozesse sollte zumindest für die visuelle Beobachtung optimal funktionieren. Daher bietet sich eine Realisierung des Konzepts in Videotechnik an. Mit dieser ist es möglich, alle notwendigen Operationen und Schaltfunktionen bei Videofrequenzen (25 Vollbilder pro Sekunde) parallel (d.h. in Echtzeit) bzw. in der Austastlücke durchzuführen.

III. Realisierung der Gesamteinheit Kerr-Mikroskop/Bildverarbeitungssystem

Abb. 17 zeigt einen schematischen Überblick über das im vorigen Kapitel ausgearbeitete Konzept des gesamten elektronischen Systems. Die einzelnen Komponenten sind im Folgenden erläutert.

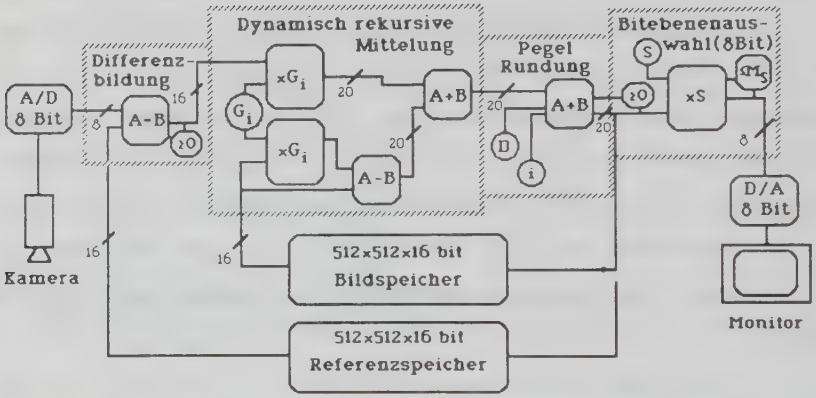


Abb. 17
Übersicht über das auf dem erarbeiteten Konzept basierende Blockschaltbild des digitalen Bildverarbeitungssystem: es besteht aus 2 Signalwandlern, 4 Rechenwerken, 3 Multiplizierern (Schieberegistern) und 2 Speichern.

III.1 Die Fernsehkamera

Als TV-Kamera wird eine Restlichtkamera mit Nahfokus-bildverstärker /21/ der Fa. Proxitronic GmbH, Darmstadt, verwendet. Mit dieser Kamera ist die genaue Kontrolle des Bildsignals möglich. Die Gleichmäßigkeut des Bildkontrasts kann durch Variation der Gradation γ (Signal = Helligkeit$^{\gamma}$) zwischen $\gamma = 0.5$ bis $\gamma = 1.5$ geregelt werden. Einflüsse des Bilduntergrunds können durch Anheben bzw. Absenken des Schwarzwertes und durch eine

Begrenzung des Weißwerts verringert werden (im Fall der Schwarzwertregelung wird der Teil des Videosignals, der die Bildinformation enthält, von der Schwarzwertschulter aus verschoben, während die Weißwertregelung die Signalspitzen abschneidet). Eine weitere wichtige Regelgröße ist die Verstärkungseinstellung (das Bildsignal wird von der Schwarzschulter aus gestreckt oder gestaucht). Mit ihrer Hilfe ist die individuelle Anpassung des Fernsehsystems an die beim Kerr-Effekt zur Verfügung stehenden geringen Beleuchtungsintensitäten z.T. herunter bis zu wenigen mLux möglich, ohne daß man die Helligkeit wie bei konventionellen TV-Kameras durch Verdrehen von Analysator bzw. Polarisator künstlich auf über 100 mLux anheben muß.

Die verwendete Fernsehröhre vom Typ Newvicon zeichnet sich durch eine breite Empfindlichkeitskurve aus, die vom blauen Licht bis ins nahe Infrarot reicht und ein breites Maximum bei ca. 700 nm aufweist (s. Kap. IV). Verglichen mit anderen Röhrentypen ist das Newvicon im Bereich von ca. 480 nm bis ca. 830 nm deutlich empfindlicher und zeigt außerdem keine Nachbrenneffekte (blooming). Da das Empfindlichkeitsmaximum des Nahfokusbildverstärkers im blauen Bereich liegt (s. Kap. IV), ist die Proxitronic-Kamera für Untersuchungen mit blauem Licht ebenso geeignet wie für Untersuchungen mit Rotlicht.

Einige Eigenschaften der Kamera erwiesen sich nach Inbetriebnahme des Bildverarbeitungssystems als nachteilig. Wurde bei relativ großen Beleuchtungsintensitäten, d.h. in den unteren Verstärkungsbereichen, gearbeitet, regelte die Kamera die Bildintensität nach, was vor allem die quantitative Auswertung der Bilder (s. Kap. V.5) verhinderte (s. /22/). Das Regelverhalten der Kamera ist in Abb. 18 dargestellt.

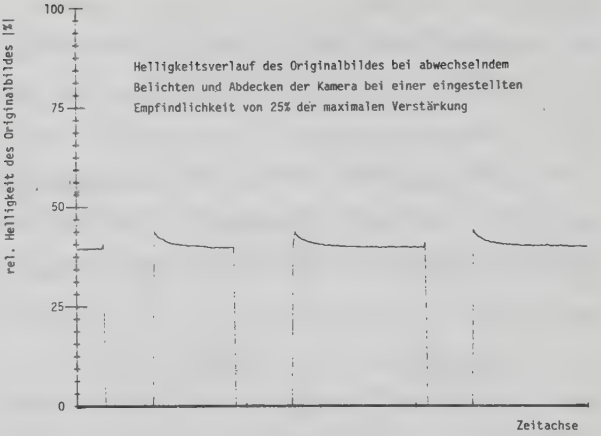


Abb. 18
Verlauf der im Differenzbildspeicher gemessenen Intensität über die Zeit. Die Peaks entstanden durch abwechselndes Belichten oder Abdunkeln der Kameraröhre.

Dieser Mangel wurde durch Entfernen des zum Schutz vor überbelichtung des empfindlichen Nahfokusverstärker parallelgeschalteten Widerstandes (1 GOhm) durch den Hersteller Proxitronic behoben. Die Schutzfunktion übernimmt jetzt eine Irisblende, die im Aufsatztubus der Kamera untergebracht ist und über eine im Bedienpult installierte Einheit zur Messung der Beleuchtungsintensität gesteuert wird.

Der vorgesehenene Regelbereich der Weißwertbegrenzung erwies sich als zu gering. Durch einen kleinen Eingriff in die Elektronik konnte dieser mehr als verdoppelt werden.

III.2 Das Bildverarbeitungssystem

Das Bildverarbeitungssystem wurde nach dem im Kapitel II erarbeiteten Konzept vom Entwicklungsbüro Doslik, Stuttgart, entwickelt. In Abb. 19a ist das Blockschaltbild des Bildverarbeitungssystems abgebildet, so wie es von der Fa. Doslik realisiert wurde. Es sind alle notwendigen Änderungen gegenüber der ursprünglichen Vorlage eingetragen, die sich im Laufe des Betriebs

als sinnvoll bzw. notwendig erwiesen. Diese Änderungen wurden von W. Rave im Rahmen der Vorbereitung seiner Diplomarbeit /22/ in Zusammenarbeit mit dem Entwicklungsbüro Doslik durchgeführt. In Abb. 19b ist das Blockschaltbild des Videoprozessors abgebildet.

Im Bildverarbeitungssystem wird die benötigte schnelle Logik hardwaremäßig durch Rechenwerke und Schieberegister realisiert, die durch einen eigenen Mikroprozessor gesteuert werden (Abb. 19b). Das Hauptprogramm wird zyklisch jeweils durch den Austastimpuls des Videosignals gestartet. Entsprechend den extern an einem Bedienpult eingestellten Funktionen, die der Mikroprozessor über ein Register abfragt, werden dann Unterprogramme aufgerufen, die die Operationen ausführen. Neben dem manuellen Betrieb hat man zusätzlich zum vorgesehenen Konzept die Möglichkeit, das Bildverarbeitungssystem über einen Rechner zu betreiben. Über ein geeignetes Interface (DMA: Direct Memory Access) können Steuerworte übertragen werden, die intern wiederum vom Mikroprozessor über ein Register abgefragt werden (Abb. 19a).

Im Folgenden ist das Ablaufschema des Bildverarbeitungssystems dargestellt (Abb. 17, 19):

Das von der Kamera erzeugte analoge Bildsignal wird im Bildverarbeitungssystem weiterverarbeitet. Zuerst muß der Inhalt des Referenzbildspeichers gelöscht werden, bevor das im 8 Bit A/D-Wandler digitalisierte Bild im Originalbildspeicher abgelegt werden kann. Alle weiter einkommenden Bilder desselben Objekts werden nun entsprechend der Rekursionsformel für die dynamische Mittelung (Verfahren III) miteinander verknüpft. Während des Mittelungszyklus steigt nun die Anzahl der genutzten Bits von 8 auf die 16 Bit der Speichergröße an. Nach jeder Mittelung wird das Ergebnis durch Addition der letzten 4 Bit des Bildzählers (zyklisch) gerundet. Nach Abschluß der Mittelung wird das Bild in den Referenzbildspeicher transferiert, die Länge des Mittelungs-

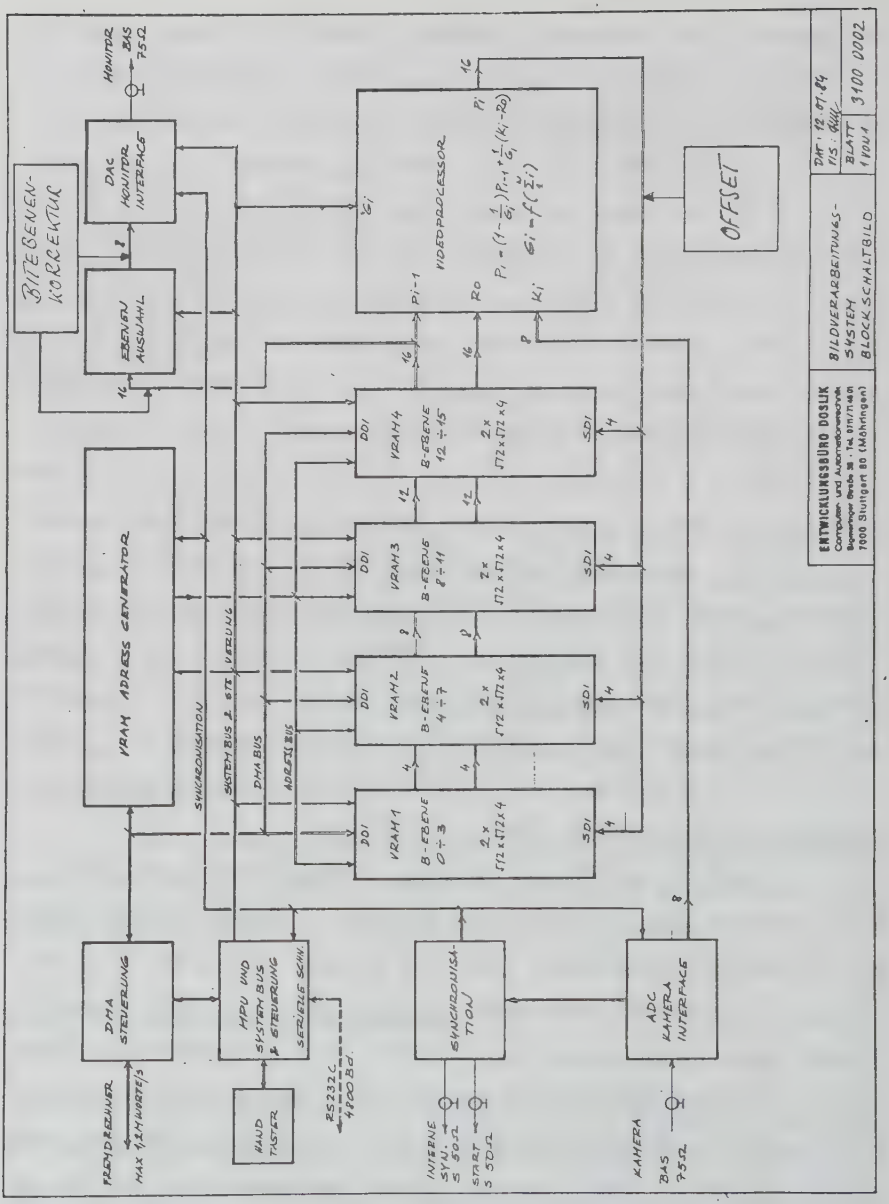


Abb. 19a
Blockschaltbild des realisierten Bildverarbeitungssystems: zusätzlich zu dem erarbeiteten Konzept sind folgende Erweiterungen vorhanden: DMA für Fremdrechneranschluß, Bitebenenkorrektur und Offset. (MPU: Micro Processing Unit, VRAM: Video Random Access Memory ((Speicherplatten)). Diese Änderungen wurden vom Ingenieurbüro Doslik und W. Rave integriert.

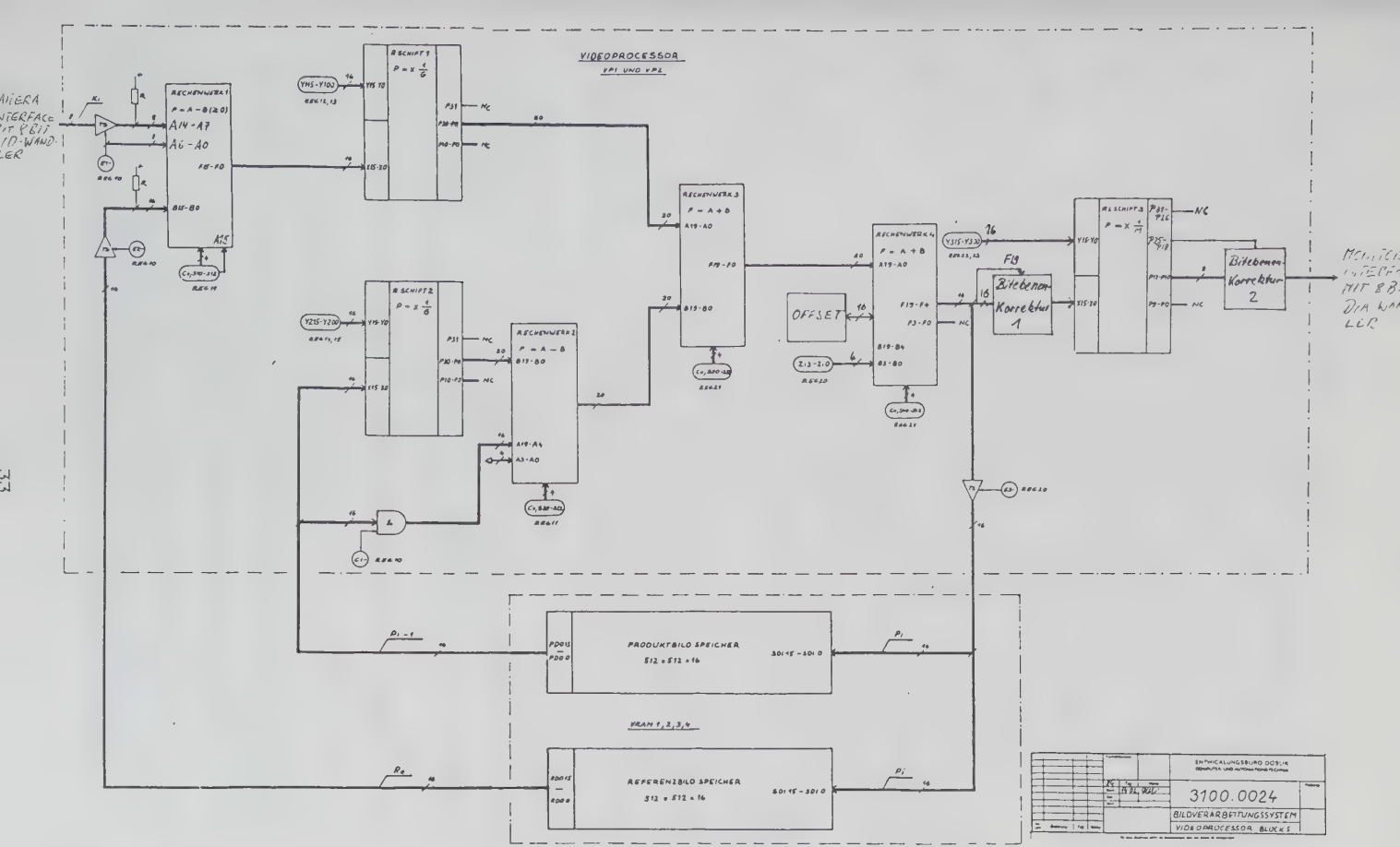


Abb. 19b. Aufbau des Videoprozessors (s. Abb. 19a): Er besteht aus 4 Rechenwerken, 3 Schieberegistern (Shift) und Registern, an denen die interne Mikroprozessorsteuerung eingreift. Es sind alle Erweiterungen enthalten (an Rechenwerk 1 und 4 sowie am

zyklus kann zwischen 1 Mittelung und 1800 Mittelungen eingestellt werden. Dieses Referenzbild wird nun von den folgenden einkommenden Bildern subtrahiert. Die entstehenden Differenzen werden in der selben Weise weiter verarbeitet wie vorher das Referenzbild und werden dabei laufend auf dem Monitor dargestellt. Dadurch können auch dynamische Prozesse beobachtet werden, wenn man im Differenzbildmodus niedrige Mittelungstiefen wählt.

Aufgrund der geringen magnetooptischen Kontraste werden die entscheidenden Informationen meist in den niederwertigeren gesetzten Bits des 16 Bit Wortes enthalten sein. Mit Hilfe eines Bitebenenselektors können die 8 Bit ausgewählt werden, die die relevante Bildinformation darstellen.

Die Behandlung negativer Differenzen, die durch das Rauschen des Bildes verursacht werden, ist ein weiterer entscheidender Gesichtspunkt. Sie dürfen nicht einfach abgeschnitten, d.h. gleich Null gesetzt werden, da das bei geringen Unterschieden zwischen Referenz- und Normalbild zu einem Gleichrichten des Rauschens bei der Differenzbildung führen würde, da ja nur über die positiven Rauschausschläge gemittelt würde. Ebenfalls nicht darstellbar wäre eine Intensitätsverringerung des Grundsignals aufgrund von Magnetisierungsprozessen. Dieses Problem wurde durch eine Änderung am Rechenwerk 1 (Abb. 19b) wie folgt gelöst:

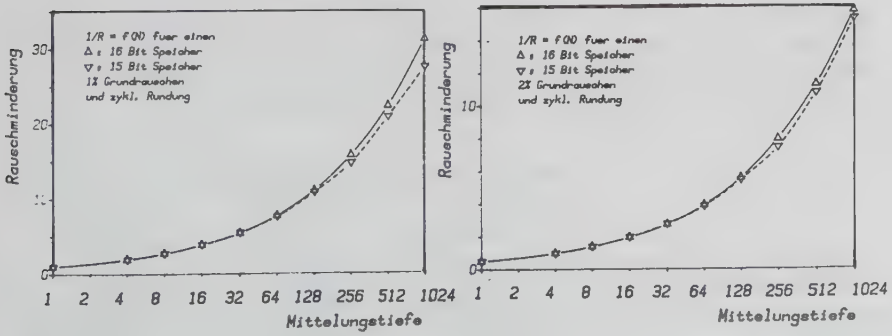
Im einkommenden Bild wird das höchstwertige (das 16.) Bit = 1 gesetzt. Diese Anhebung des einkommenden Bildes bewirkt, daß die Differenz zweier gleicher Bilder nicht mehr um Null schwankt, sondern um die Hälfte der sonst darstellbaren maximalen Intensität. Um eine Anhebung des Referenzbildes zu vermeiden, wird beim Abspeichern desselben das höchstwertige Bit nicht gesetzt. Somit wird anschließend auch über negative Rauschausschläge gemittelt. Die Information wird anschließend korrekt auf dem Bildschirm dargestellt indem das gesetzte höchstwertige Bit

am Bitebenenselektor ausgeblendet wird.

Negative Differenzen können auch, wie schon kurz erwähnt, aufgrund von Magnetisierungsprozessen entstehen. In diesem Fall ist es sinnvoll, den Pegel des Referenzbildes um einen am Bedienpult einstellbaren bestimmten Wert abzusenken (Pegelanhebung des Differenzbildes). Dieser Offset greift am Rechenwerk 4 ein (s. Abb. 19b). So erhält man bei einem bezüglich des Grundsignals abgeschwächten Eingangssignal positive Differenzen.

Bedingt durch diese Maßnahmen werden Bildpunkte, die im Referenzbild eine höhere Intensität besitzen als im einkommenden Bild, nicht schwarz dargestellt. Logische Bausteine im Datenstrom führen in diesem Fall eine Dunkeltastung durch (Bitebenenkorrektur 1, Abb. 19b). Entsprechend werden Punkte, die den Bereich der ausgewählten 8 Bit überschreiten, hellgetastet (Bitebenenkorrektur 2, Abb. 19b).

Das Setzen des 16. Bit zur Vermeidung negativer Differenzen bewirkt eine Reduzierung des Speicherinhalts auf 15 Bit. In diesem Fall ist die erzielbare Rauschminderung verglichen mit



a) b)

Abb. 20
Vergleich der Rauschminderung für einen 16 und einen 15 Bit Speicher bei einem Eingangsrauschen von 1% (a) und 2% (b)

dem Verlauf des 16 Bit Speichers nur geringfügig kleiner. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 20 für ein angenommenes Grundrauschen von 1% (a) bzw. 2% (b) als Ergebnis der beschriebenen Rauschsimulation festgehalten.

Durch diese Reduzierung des Speicherbedarfs steht die 16. Speicherzeile des Referenzbildspeichers als Overlayebene bei Rechnerbetrieb zur Verfügung.

Alle oben beschriebenen Operationen werden in Echtzeit durchgeführt. Bei der Fernsehfrequenz von 50 Halbbildern pro Sekunde erhält man Mittelungszeiten von 4s bei einem Zyklus von 100 Mittelungen und 72 s bei 1800 Mittelungen.

Detailliertere Informationen über die in diesem Kapitel beschriebenen Funktionen und Elemente des Bildverarbeitungssystems (Mikroprozessor, Aufbau des Prozessors, Rechnersteuerung etc.) sind in /22/ zu finden.

III.3 Das Bedienpult

Wie schon erwähnt kann das Bildverarbeitungssystem entweder über einen Computer oder ein Bedienpult (Abb. 21) gesteuert werden. Das im Normalfall verwendete Bedienungspanel steuert direkt einen Mikroprozessor an und hat gegenüber dem Rechner den Vorteil einer einfachen Handhabbarkeit.

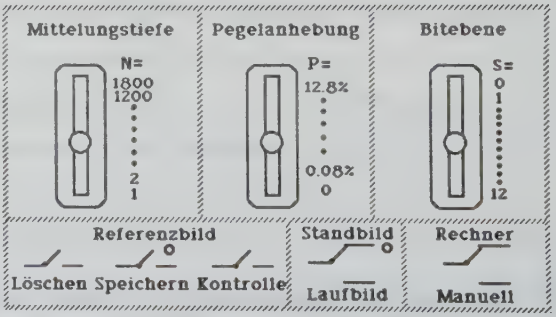


Abb. 21
Schematische Darstellung des Bedienpults des Bildverarbeitungssystems

Folgende Funktionen können vom Bedienpult aus durchgeführt werden:

- Wahl zwischen manueller und computergesteuerter Bedienung.
- Wahl zwischen Lauf- und Standbild: im Laufbildmodus wird nach jedem abgeschlossenen Mittelungszyklus einer neuer gestartet. Im Standbildmodus wird das Differenzbild nach Abschluß des Mittelungsvorgangs eingefroren.
- Löschen des Referenzbildspeichers.
- Speichern des Referenzbildes: der Inhalt des Referenzbildspeichers wird gelöscht und anschließend das Referenzbild mit der voreingestellten Mittelungszahl erzeugt. Nach dem Abspeichern wird automatisch das Differenzbild auf dem Monitor dargestellt.
- Referenzbildkontrolle: das gespeicherte Referenzbild erscheint bei Betätigen dieses Schalters am Bildschirm.
- Wahl der Mittelungstiefe: Die Anzahl der Einzelbilder pro Mittelungszyklus kann aus 16 festen Einzelwerten zwischen 1 und 1800 gewählt werden.
- Pegelanhebung des Differenzbilds: Der Offset kann zwischen 0 und 12.8 % der Referenzbildintensität angehoben werden.
- Bitebenenauswahl: Es werden die 8 Bit aus den 15 Datenbits herausgegriffen, die die relevante Bildinformation enthalten. Das entspricht einer Bildverstärkung um den Faktor 1 bis 4096.

III.4 Stabilitätsanforderungen

In der Erprobungsphase nach Installation des Gesamtsystems stellte sich heraus, daß die in Kap. I.3 geschilderten apparativen Anforderungen an das Mikroskop bei Anwendung der magnetooptischen Effekte (Köhlerscher Strahlengang, Lichtquelle, Filter etc.) für die anschließende Verarbeitung des Bildes in

einem Bildprozessor nicht ausreichen: Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems hängt entscheidend davon ab, wie gut es mechanisch, thermisch, elektrisch und magnetisch stabilisiert werden kann, da selbst geringste Verschiebungen zwischen Referenz- und Normalbild die Unterdrückung des Untergrundes im Differenzbild verhindern. An diesen im folgenden beschriebenen Stabilisierungsmaßnahmen waren u.a. die (z.T. ehemaligen) Mitarbeiter der Magnetgruppe L. Schmidt, M. Prell, W. Grimm und W. Rave beteiligt. Sehr viele Beiträge lieferte vor allem J. Pfannenmüller, der sich bei der Beseitigung von Instabilitäten aller Art und bei der Gestaltung des Arbeitsplatzes besonders engagierte.

Mechanische und magnetische Stabilität:

Zur Vermeidung von niederfrequenten Schwingungen steht das Mikroskop auf einer schweren Granitplatte, die auf geeignet dimensionierten Schwingungsdämpfern der Fa. Stop Chock gelagert ist. Weiterhin wird die Kamera mit Hilfe einer aufs Mikroskop geklemmten Schiene abgestützt. Dadurch sind nur noch reversible Verschiebungen der beiden Elemente gegeneinander möglich.

Bei der Untersuchung der Proben ist die Anwendung z.T. sehr hoher Magnetfelder bis hinauf zu 1000 kA/m notwendig, die zu Probenbewegungen relativ zur Mikroskopachse führen können. Diese werden durch folgende Maßnahmen unterbunden:

- Zur Vermeidung von Feldgradienten, die Kräfte auf die Proben ausüben können, müssen so viel magnetische Bestandteile des Mikroskops wie möglich, vor allem in Probennähe, durch unmagnetische ersetzt werden.

- Um eine Bewegung der Probe, die direkt durch die Anziehung vom Magneten verursacht wird, zu verhindern, müssen verwindungsfreie Probenhalter (z.T. aus VA-Stahl) verwendet werden. Die Befestigungsschiene der Probenhalter muß ebenfalls gegen eine

steifere VA-Schiene eingetauscht werden. Schließlich müssen die Proben natürlich fest auf die Halter aufgeklebt werden. Dazu eignet sich UHU-Hart, der im gehärteten Zustand hinreichend steif ist, sich aber in Aceton auflösen läßt, also das zerstörungsfreie Ablösen der Proben ermöglicht.

Zum Schutz der Fernsehröhre der Kamera vor diesen Magnetfeldern, die zu einer Verzerrung des Referenzbildes führen würden, ist die Kamera mit einer Permalloyabschirmung von 1mm Dicke umgeben (VAC GmbH, Hanau). Die abschirmende Wirkung ist so gut, daß bei den oben erwähnten Feldern von 1000 kA/m am Probenort die in Höhe der Elektronenröhre auftretenden Felder keinen meßbaren Einfluß auf die Fernsehbilder mehr zeigen.

Thermische Stabilisierung

Temperaturstörungen, die von verschiedenen Quellen ausgingen, hatten ebenso einen erheblichen Einfluß auf die Qualität der gewonnenen Differenzbilder. Ein Kriechen des Bildes rührte von einer instationären Erwärmung der Kamera bis auf 60°C her. Die Ursache dafür liegt in der Behinderung des Austauschs der von der Kameraelektronik erzeugten Wärme mit der Umgebung durch die Permalloy-Abschirmung. Zur Abhilfe wird gefilterte Preßluft laminar in vorgegebenen Kanälen sowohl in als auch außerhalb der Kamera durchgeleitet, was eine konstante Temperatur von 30°C, die spätestens 10 min nach Einschalten erreicht ist, gewährleistet.

Ebenfalls mit Luft werden die Probe und das Innere des Mikroskopgehäuses gekühlt. In beiden Fällen hat man den Vorteil, das durch den entstehenden leichten Überdruck eine Verschmutzung der Probe bzw. der innenliegenden Filter und Linsen verhindert wird. Um eine Erwärmung der Probe von den Magnetisierungsständen her auszuschließen, müssen diese wassergekühlt werden.

Eine weitere störende Wärmequelle stellt die Quecksilberhöchstdrucklampe dar. Durch Wärmeleitung wurden Mikroskopteile, die sich in der näheren Umgebung des Lampengehäuses befanden, auf über 100°C erwärmt. Durch eine Wasserkühlung am Anschlußtubus des Lampengehäuses wird die Wärmeübertragung über das Mikroskop verhindert. Die von der Lichtquelle abgestrahlte Wärme wird außerdem größtenteils durch Filter abgefangen, die sich an der gekühlten Stelle im Tubus befinden.

Elektrische Stabilisierung

- Wie bereits in Kap. III.1 erwähnt, wurde das Nachregeln der Helligkeit durch die Kamera mit dem Entfernen eines Schutzwiderstandes durch die Fa. Proxitronic beseitigt.

- Die Stabilität der Quecksilberhöchstdrucklampe wurde durch Verwendung eines stabilisierten Netzgeräts deutlich verbessert. Die restlichen Schwankungen aufgrund von Fluktuationen im Leuchtkolben werden zwar teilweise während des Mittelungsprozesses herausgemittelt, jedoch mußte Rave /22/ für die quantitativen Messungen auf eine Halogenlampe zurückgreifen, die wesentlich stabiler ist /23/. Dabei war aber die gravierend geringere Leuchtdichte in Kauf zu nehmen, was eine Anwendung auf Proben mit schwachen magnetischen Kontrasten wie z.B. CoCr-Schichten verhindert. Es bieten sich 2 Lösungen an, die am Institut weiterverfolgt werden: die Verwendung eines Helium-Neon-Lasers oder die elektronische Nachregelung der Lichtquelle.

- Die elektrische Störanfälligkeit des Bildverarbeitungssystems konnte durch geeignete Verdrahtungsmaßnahmen erheblich verringert werden, die vom Ingenieurbüro Doslik und der Elektronikwerkstatt der technischen Fakultät zusammen mit Herrn Rave durchgeführt wurden.

III.5 Magnetisierungsstände

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden zwei verschiedene Magnetisierungsstände zum Erzeugen von Magnetfeldern direkt unter der Probe im Mikroskop benötigt. Ein Magnet erzeugt horizontale Felder bis 100 kA/m und wird bei der Untersuchung von Materialien mit in der Probenebene liegender Magnetisierung angewandt. Der andere dient speziell der Untersuchung von CoCr-Schichten mit ihrer senkrecht zur Oberfläche stehenden Polarisation. Aufgrund der hohen Sättigungsmagnetisierung und Koerzitivfeldstärke werden zur vertikalen Sättigung dieser Schichten Feldstärken bis hinauf zu 800 kA/m benötigt.

Sämtliche Spulen wurden freundlicherweise von Herrn Lucius (Siemens AG, UbMed Erlangen) zur Verbesserung der Wärmeableitung und elektrischen Belastbarkeit mit Kunststoff getränkt.

Der Magnet für horizontale Felder

Dieser Magnet ist in Abb. 22 schematisch dargestellt. Die Probe sitzt in der Mitte oberhalb des inneren Jochs, das aus einem Schnittbandkern besteht, der mir freundlicherweise von der Vacuumschmelze Hanau zur Verfügung gestellt wurde. Auf den Schenkeln sitzen Spulen, die mit einem Kupferdraht von 1mm Durchmesser bewickelt sind (Windungszahl n = 421). Um einen guten Wirkungsgrad zu erzielen, wurde der Querschnitt des Jochs so weit verringert, daß die in dieser Anordnung erreichbare Flußdichte etwa 1.5 Tesla bei einem Spulenstrom von 5A beträgt (Die maximale Flußdichte darf für die Schnittbandkerne nicht größer als 1.8 Tesla sein, da sonst die Permeabilität unter 5000 sinkt /24/ und die Strom-Feld-Kennlinie des Magneten dann nicht mehr linear verläuft). Zur Vermeidung von Sättigungseffekten an den Kanten des Jochs wurden diese abgerundet. Die Pole sind zur Probe hin kegel-

förmig ausgeschliffen, wodurch das horizontale Feld sowohl zwischen den Polen als auch über die Poltiefe T plateauförmig verläuft. Dieses Plateau hat eine Ausdehnung von 2cm in beiden Richtungen unmittelbar über der Polabschlußebene bei einer zulässigen Magnetfeldschwankung von 3%. In 8mm Höhe ist das Plateau immerhin noch 1cm breit. Dadurch werden zu starke Kräfte auch auf größere Proben vermieden. Zwischen den beiden Polenden befindet sich zusätzlich eine flache Spule (Ø = 1.4mm, n = 10) zum Anlegen von vertikalen Hilfsfeldern bis 50 A/cm.

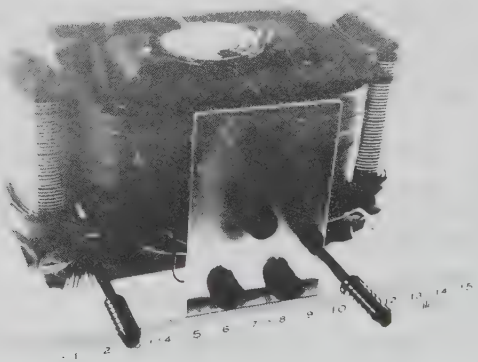


Abb. 22
Der Magnet zur Erzeugung homogener horizontaler Felder.

Das äußere Joch aus verklebten Goss-Blech-Einzelstreifen und die dazugehörigen Spulen (Ø = 1.4mm, n = 140) wurden so dimensioniert, daß das Feld der inneren Anordnung in Höhe der Kameraröhre kompensiert wird, eine Maßnahme, die sich aufgrund der guten Wirkung der Kameraabschirmung (s. Kap. III.4) im nachherein als nicht unbedingt notwendig erwies.

Sowohl die Joche als auch die Spulen werden mit Hilfe von geeignet verlegten Kupferkühlschlangen (Vermeiden eines magnetischen Kurzschlusses im Hinblick auf Wechselfeldanwendungen!) mit Wasser gekühlt. Zum Schutz vor äußeren Einflüssen und zur gleichmäßigen Wärmeableitung wurde die gesamte Einheit mit Epoxidharz vergossen.

Der Magnet für senkrechte Felder

Dieser Magnet ist in Abb. 23 gezeigt. Er besteht aus einem geschlossenen Joch aus 6mm starkem Eisen. Auf den seitlichen Flanken befinden sich zur besseren Führung des magnetischen Flusses zusätzlich 4mm starke Platten, die nach oben hin angeschrägt sind. In der Mitte des Jochs sitzt ein Dorn, an dessen Spitze der Magnetfluß konzentriert wird. Das dort maximal erreichbare Feld liegt bei etwa 1000 kA/m. Eine Homogenisierung des Feldes von 3mm Durchmesser wird durch eine kegelförmige Mulde in der Spitze erreicht. Die Spule besitzt aus kühltechnischen Grün-

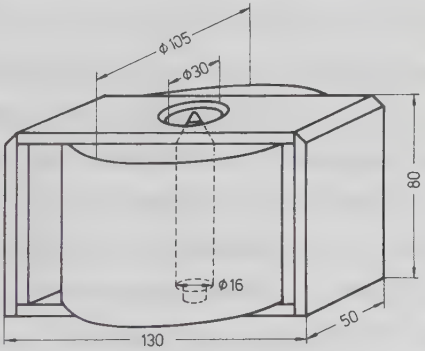


Abb. 23
Magnet zum Erzeugen von vertikalen Feldern bis 1000 kA/m unter dem Mikroskop.

den einen Messingkörper (der Magnet soll nicht zur Erzeugung hochfrequenter Wechselfelder verwendet werden) mit wassergekühltem Boden und ist mit einem Kupferdraht von 1.2mm Durchmesser bewickelt (n = 1730). Um eine optimale Kühlung zu gewährleisten, werden die Oberseite des Spulenkörpers und das Joch zusätzlich mit einer Rohrleitung gekühlt. Außerdem sind alle Kontaktflächen der Spule mit dem Joch und dem Dorn zur besseren Wärmeübertragung mit einer Wärmeleitpaste versehen.

Der Magnet wird zentrisch auf einem justierbaren Mikroskoptisch gesetzt, mit dem die Dornspitze in die Mitte des Beobachtungsfeldes des Mikroskops gesetzt werden kann.

Steuerung der Magnete

Diese Magnetisierungsstände werden von bipolaren Netzgeräten der Fa. Kepco gespeist, die über Steuergeräte bedient werden, die von der Elektronikwerkstadt der Technischen Fakultät Erlangen speziell für diese Zwecke entwickelt wurden. Die Stromstabilität beträgt 10^{-4}. Folgende Funktionen können gesteuert werden (Abb. 24):

- stufenlose Einstellung von -5A bis +5A Gleichstrom, der mit hoher Genauigkeit digital angezeigt wird und beliebig invertiert werden kann
- Überlagerung eines Wechselstroms (1Hz bis 1000Hz, Gesamtamplitude (DC + AC) = 5A), dessen Amplitude zum Entmagnetisieren von Proben mit Hilfe eines Motorpotentiometers auf Null zurückgefahren werden kann. Die Entmagnetisierungszeit ist stufenlos zwischen 8s und 7min einstellbar
- Anwendung eines Sägezahn-Wechselstroms mit stufenlos regelbarer Frequenz (zwischen 0.5Hz und 6Hz) und Amplitude (0 bis 5A) z.B. zum Aufnehmen eines Wechselfeld-Referenzbildes
- externe Einspeisung anderer Spannungsverläufe.

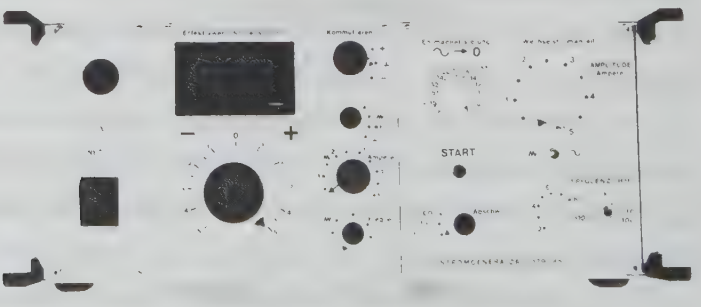


Abb. 24
Frontansicht des Steuergeräts für die Magnetisierungsstände.

IV. Analyse des Systems

In diesem Kapitel soll anhand von Messungen und konkreten Beispielen die Leistungsfähigkeit des Systems bestätigt werden. Zunächst wird daher die tatsächlich erreichbare Rauschminderung mit den in Kap. II theoretisch ermittelten Werten verglichen.

IV.1 Rauschmessung

IV.1.1 Das Meßverfahren

Die Rauschmessung wurde mit Hilfe eines Kleinrechners (HP 9825 A) durch Auslesen der Inhalte des Referenz- und Differenzbildspeichers durchgeführt. Ein Teil der benötigten Software wurde mir dabei von Herrn Rave zur Verfügung gestellt. Der Ablauf der Rauschmessung ist im folgenden beschrieben:

Zunächst wird ein Referenzbild mit einer vorzugebenden Mittelungstiefe aufgenommen. Anschließend werden fünf aufeinanderfolgende Differenzbilder derselben Mittelungstiefe ausgewertet, bevor ein neues Referenzbild gespeichert und der Mittelungszyklus für die anschließenden Differenzbilder um eine Stufe erhöht wird (insgesamt 15 Stufen von 1 Mittelung bis 1800 Mittelungen). Mit Hilfe der aus den fünf Differenzbildern ermittelten Rauschwerte kann durch lineare Regression auf den Rauschwert zum Zeitpunkt t=0 (Beginn der jeweiligen Abspeicherung des Referenzbildes) extrapoliert werden. Dadurch sollen Fehler aufgrund von Langzeitdrifterscheinungen möglichst ausgeschaltet werden.

Die Auswertung der jeweiligen Differenzbilder läuft folgendermaßen ab: je Bild werden 4 Fenster a 50x50 Bildpunkte festgelegt. (Eine Auswertung größerer Bereiche ist wegen des

begrenzten Speichervorrats des Kleinrechners nicht möglich). Für jedes Fenster wird der Mittelwert der Intensität des Referenz- (I_R) und Differenzbildes (I_D) ermittelt. Die Abweichungen dI der einzelnen Bildpunktintensitäten vom Mittelwert der Differenz I_D werden quadriert und anschließend über alle Bildpunkte (n=2500) summiert. Das Rauschen R_G ergibt sich dann als der Quotient aus der Wurzel der Summe und der mittleren Referenzbildintensität I_R:

$$R_G = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} dI^2} / I_R \qquad (1)$$

Der Mittelwert aus den 4 Fenstern ergibt einen Meßwert, der die örtliche Schwankungen des Bildes berücksichtigt.

Aufgrund der bei dieser Meßmethode bedingten Fehlerfortpflanzung ist noch eine Korrektur der Ergebnisse notwendig. Das gemessene Gesamtrauschen R_G setzt sich aus dem Rauschen des Differenzbildes R_D und des Referenzbildes R_R wie folgt zusammen:

$$R_G = \sqrt{R_R^2 + R_D^2} \qquad (2)$$

Stimmen die Mittelungstiefen des Referenz- und Differenzbildspeichers überein, so gilt:

$$R_{G,0} = \sqrt{2} \cdot R_{R,0} \qquad (3)$$

Setzt man den sich daraus ergebenden Wert $R_{R,0}$ in Gl.(2) für das Rauschen des Referenzbildes ein, so erhält man für das gesuchte Rauschen des Differenzbildes:

$$R_D = \sqrt{R_G^2 - R_{G,0}^{2/2}} \qquad (4)$$

IV.1.2 Ergebnisse der Rauschmessung

In Abb. 25 ist der Verlauf des Kehrwertes der so korrigierten Meßwerte als Funktion der Mittelungstiefe des Differenzbildes festgehalten. Es ist einerseits die Abhängigkeit von der Lichtquelle (HBO - Halogen) bei einer Mittelungstiefe des Referenzbildes von N(Ref)=100 und andererseits die Wirkung einer höheren Mittelungstiefe N(Ref)=1800 am Beispiel der Halogenlampe gezeigt. Bei diesen Messungen betrug die Intensität des Originalbildes etwa die Hälfte der maximalen darstellbaren Intensität, ein Wert, der im Bereich der in der Praxis am meisten verwendeten Intensitäten liegt. Der Fehler wurde wie folgt bestimmt: Es wurden pro Kurve 3 unabhängige Meßzyklen durchgeführt. Innerhalb eines Zyklus wurde für jeden Meßpunkt die statistische Unsicherheit der linearen Regression da_i berechnet. Der Quotient aus diesem Wert und dem durch Regression ermittelten Rauschwert wurde quadriert und anschließend je Meßpunt die Summe über die 3 Zyklen gebildet. Der Fehler dR/R ergibt sich dann als die Wurzel aus dieser Summe:

$$dR/R = \pm\sqrt{\sum_{i=1}^{3}(da_i/a_i)^2} \qquad (5)$$

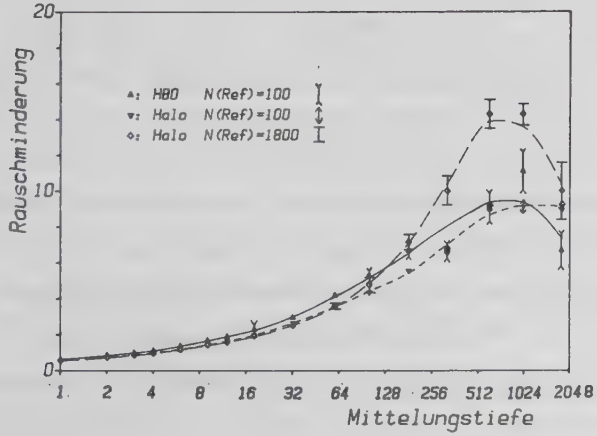


Abb. 25
Die gemessene Rauschminderung als Funktion der Mittelungstiefe des Differenzbildes bei Variation der Lichtquelle und der Mittelungstiefe des Referenzbildes.

Anhand des Wertes für N(Dif)=1 ergibt sich ein Eingangsrauschen zwischen 1.5% und 2%, was die in Kap. II.2.3 gemachte Annahme eines Grundrauschens größer 1% bestätigt. Vergleicht man den Verlauf der 3 Kurven mit den theoretisch gewonnenen Ergebnissen der Räuschsimulation (Abb. 14) für 1% und 2% Grundrauschen, so ist bis zu einer Mittelungstiefe von N(Dif)=600 eine gute Übereinstimmung festzustellen, die gemessene maximale Rauschminderung entspricht der Größenordnung des theoretischen Maximalwertes. Die Anomalien bei höheren Mittelungszahlen sind auf nicht korrigierbare Langzeitdrifterscheinungen zurückzuführen, die wohl zum großen Teil durch Instabilitäten, die bisher noch nicht beseitigt werden konnten, verursacht werden, was auch aus den angegebenen Fehlern hervorgeht.

An nicht mit Balken versehenen Punkten ist der Fehler kleiner als die Symbolgröße. Er liegt für 1 Mittelung in der Größenordnung $\pm$2% bei allen Kurven und steigt bis etwa 10% bei 1800 Mittelungen im Fall der Kurven für die Quecksilberhöchstdrucklampe HBO und der Halogenlampe bei N(Ref)=1800 an. Dagegen liegen die Schwankungen bei dem für die Halogenlampe mit N(Ref)=100 gemessenen Verlauf auch bei hohen Mittelungszahlen nicht oberhalb 3.5%. Der Unterschied zwischen den beiden Messungen für die Halogenlampe ist ein Indiz für die oben gemachte Annahme, daß die Anomalien von Drifterscheinungen herrühren.

Die Kurven für die Halogen- und die Quecksilberhöchstdrucklampe zeigen bis N(Dif)=600 keine gravierenden Unterschiede, was auch aufgrund der gleich eingestellten Intensität zu erwarten ist. Allerdings muß man, um diese Intensität mit der Halogenlampe zu erreichen, die Aperturblende mindestens doppelt so weit öffnen wie im Fall der HBO-Lampe und zusätzlich den Analysator etwas aufdrehen, was einen entscheidenden Kontrastverlust bedingt. Der gravierende Unterschied zwischen den ermittelten Fehlern im Fall

der HBO- und der entsprechenden Halogenkurve (N(Ref)=100 ist wohl auf die Tatsache zurückzuführen, daß die Quecksilberhöchstdrucklampe erheblich instabiler ist als die Halogenlampe.

Vergleicht man nun die unterschiedlichen Mittelungstiefen des Referenzbildes miteinander, so ist festzustellen, daß die Rauschminderung im Fall von N(Ref)=1800 überhaupt erst oberhalb von N(Dif)=320 deutlich besser wird, während sich die Werte unterhalb in der gleichen Größenordnung wie für N(Ref)=100 bewegen. Das ist für die Praxis von Bedeutung:

In den meisten Fällen ist es ausreichend, sowohl das Referenz- als auch das Differenzbild mit einer Mittelungstiefe von N=100 oder N=320 aufzunehmen, was aufgrund der erheblich kürzeren Aufnahmezeiten von 4s bzw. 12.8s viel praktikabler ist. Dieser Sachverhalt hat sich auch in der Praxis bestätigt.

Die Rauschminderung in Abhängigkeit von der Mittelungstiefe ist in Abb. 26 am Beispiel eines Details der Domänenstruktur eines eisenreichen metallischen Glases im abgeschreckten Zustand demonstriert. Es wurde das gleiche Muster bei vier unterschiedlichen Mittelungsstufen aufgenommen, die Mittelungstiefe des Referenzbildes betrug N(Ref)=100. Während bei einer Mittelung (Abb. 26 a) die feinen Strukturen des Spannungsmusters kaum zu erkennen sind, werden mit wachsender Mittelungstiefe immer mehr Einzelheiten sichtbar. Die nicht vollständige Beseitigung des Untergrundes ist auf Instabilitäten zurückzuführen.

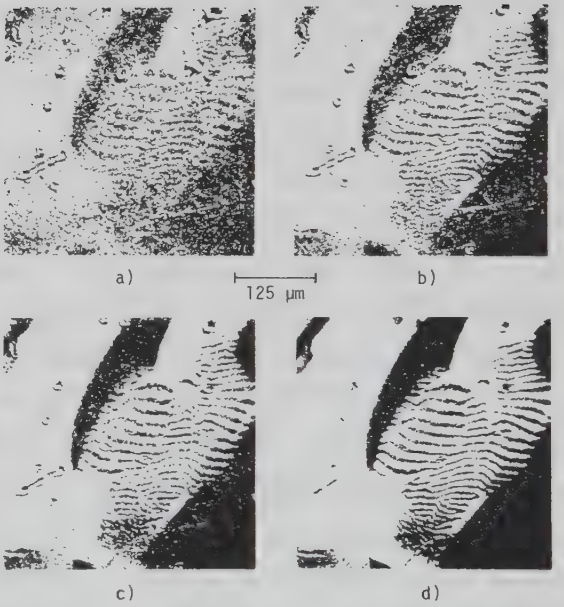


Abb. 26
Spannungsmuster auf einem eisenreichen metallischen Glas von 30 µm Dicke bei vier verschiedenen Mittelungsstufen: a) N=1, b) N=32, c) N=100 und d) N=1000. Die Bilder wurden mit einem Objektiv der numerischen Apertur A=0.35 aufgenommen. Es wurden bei einem Offset P=3.2% die Bits 5 bis 12 (das einkommende Bild belegt die Bits 7-14) betrachtet, das entspricht einer Verstärkung des Differenzbildes um den Faktor 2^2 (S=2).

Neben der Variation der Mittelungstiefe bieten sich noch verschiedene problemorientierte Möglichkeiten der Referenzbilderzeugung an, die im nächsten Kapitel kurz erläutert werden.

IV.2 Referenzbildmöglichkeiten

In der Regel wird man das zur Beseitigung des Bilduntergrundes notwendige Referenzbild durch Abspeichern des gesättigten Zustandes der Probe gewinnen. Für einige spezielle Anwendungen ist es jedoch sinnvoll bzw. unumgänglich, ein Referenzbild auf andere Weise zu erzeugen. Dafür bieten sich drei weitere Möglichkeiten an:

IV.2.1 Differenzbildung durch Verändern der Polarisatorstellung

Bei dieser Methode wird nach der Aufnahme des Referenz-

bildes der Kontrast im Kerr-Mikroskop durch Verdrehen des Analysators bzw. des Polarisators durch die Auslöschungsstellung hindurch verändert. Diese Methode wird dann angewandt, wenn die zu beobachtende Domänenstruktur erhalten bleiben soll bzw im Fall von Dauermagneten nicht zerstört werden kann. Das gilt z.B. auch bei der Untersuchung von Speichermedien, in die Information hineingeschrieben wurde. Die in Abb. 56 (Kap. VI) gezeigte Aufnahme der beschriebenen Spur auf auf einer mit CoCr bedampften Festplatte wurde auf diese Weise gewonnen.

Zum Vergleich mit der herkömmlichen "Sättigungsmethode" ist in Abb. 27 das mit einem Metall-Aufzeichnungs-Band der Zusammensetzung $Co_{80}Ni_{20}$ aufgezeichnete Muster dargestellt (Die Probe wurde uns von der BASF AG, Ludwigshafen, zur Verfügung gestellt). Im Analysator-Differenzbild (Abb. 27a) wird der Untergrund aufgrund polarisierender Effekte der Störungen nicht so gut beseitigt wie im Sättigungs-Differenzbild (Abb. 27b).

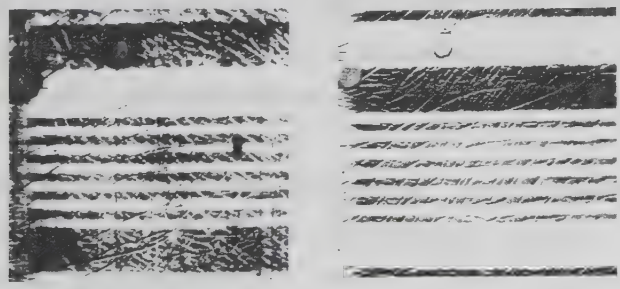


Abb. 27
Aufzeichnungsmuster auf einem Metallband $Co_{80}Ni_{20}$ (schräg bedampft) der Dicke 0.14µm (BASF AG, Ludwigshafen):
a) Analysator-, b) Sättigungsdifferenzbild.

IV.2.2 Wechselfeld-Referenzbild

Hierbei wird das Referenzbild bei einem an der Probe anliegenden Wechselfeld aufgenommen. Während des Mittelns wird dabei über sämtliche Helligkeiten integriert. Zum Schluß erhält man ein gleichmäßig graues Bild. Diese Methode eignet sich besonders, um die bei massiven Proben mitunter auftretenden Verschiebungen aufgrund magnetischer Kräfte auszugleichen. Eine weitere Anwendung liegt in der Beobachtung der Domänenstrukturen von schwer zu sättigenden Materialien und der Untersuchung entmagnetisierter Zustände (nach Aufnahme des Referenzbildes wird durch Betätigen des Motorpotentiometers am Magnetsteuergerät die Probe entmagnetisiert, siehe Kap. III.5).

IV.2.3 Domänen-Differenzbild

Bei dieser Methode wird als Referenzbild ein Domänenzustand der Probe aufgenommen. Verändert man anschließend die Domänenstruktur durch Anlegen eines Magnetfeldes, so kann man die Bewegung der Domänen bzw. ihrer Wände verfolgen. Dieses Verfahren wurde bereits von M. Labrune zur Untersuchung von Zick-Zack-Domänen in dünnen Schichten aus NiCoP, die zur longitudinalen Aufzeichnung verwendet werden, an einem fremden Bildverarbeitungssystem durchgeführt, jedoch bisher nicht veröffentlicht (Abb. 28, zu den Zick-Zack-Domänen siehe /25/). Bei dieser Aufnahme fällt auf, daß die Lage der Domänen im Referenzzustand deutlich zu sehen ist. Im Gegensatz dazu sind diese Domänen bei unserer Anlage im reinen Analysator-Differenzbild nicht zu sehen. Die Ursache hierfür liegt wohl in der beschriebenen Stabilisierung unserer Kamera, die ein Nachregeln der Helligkeit, wie es bei der von M. Labrune verwendeten Kamera auftritt, verhindert.

Wie später in Abb. 54 am Beispiel einer Domänenstruktur einer CoCr-Schicht demonstriert wird, können in unserem Fall die Referenzbild-Domänen durch ein zusätzliches Verdrehen des Analysators durch die Auslöschungstellung hindurch sichtbar gemacht werden. Es ist also eine Kombination zwischen Analysator- und Domänen-Differenzbild nötig.

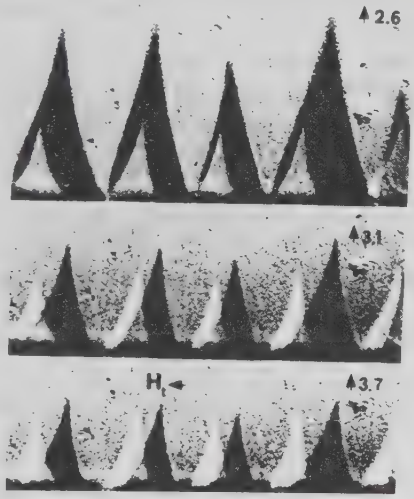


Abb. 28
Domänen-Differenzbilder von Zick-Zack-Domänen in NiCoP, die mit einem fremden System aufgenommen wurden. Die Domänen werden durch Anlegen von Feldern bewegt, deren Richtung und Stärke (in Oe) jeweils angegeben sind (von M. Labrune, Bellevue)

Weitere Möglichkeiten bei Benutzung des Bildverarbeitungssystems sind im Folgenden beschrieben.

IV.3 Grenzen und Möglichkeiten des Systems

IV.3.1 Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen eines Mikroskops hängt sowohl von der numerischen Apertur A als auch von der Wellenlänge λ des verwendeten Lichts ab /11/. Für den kleinsten auflösbaren Abstand zweier Punkte auf einem Objekt gilt

$$D_{min} = f \cdot \lambda / A \qquad (6) \ ,$$

wobei der Faktor f für unsere Anordnung (Beugung am Kreisquer-

schnitt) 0.61 beträgt /26/. Bei Verwendung eines ölimmersionsobjektivs mit der numerischen Apertur 1.25 ist eine weitere Verringerung der Auflösungsgrenze nur möglich, wenn das Objekt mit kürzerwelligem Licht beleuchtet wird. Die Grenze liegt bei etwa 400nm Wellenlänge, da hier bereits 50% des UV-Lichts von den herkömmlichen Linsen des Mikroskops absorbiert werden. Bei 360nm beträgt die Absorption 100% /27/.

Wie bereits in Kap. I.3 erwähnt, werden gewöhnlich die 546nm- und die 578nm-Linie des Spektrums der Quecksilberhöchstdrucklampe HBO 100 mittels eines gelben Kantenfilters GG495 selektiert, da sie im Empfindlichkeitsmaximum des Auges liegen (Abb. 29a). Zum Vergleich ist der Verlauf für einen blaugelben

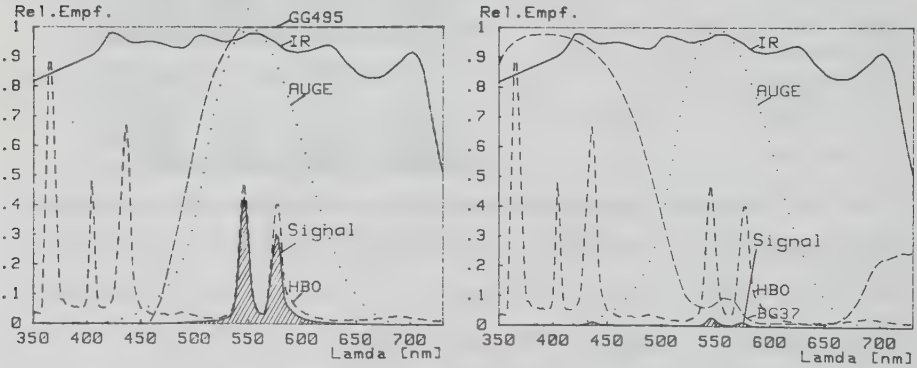
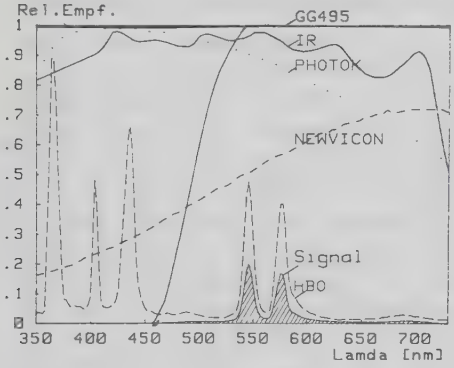


Abb. 29
Resultierendes Spektrum (≙Signal) einer HBO-Lampe bezogen auf die Augenempfindlichkeit bei Berücksichtigung der drei im Mikroskop eingebauten Wärmeschutzfilter (≙IR) und einem a) Grüngelbfilter GG495 bzw. b) Blaugelbfilter BG37. Die Verläufe der einzelnen Komponenten wurden den jeweiligen Datenheften entnommen.

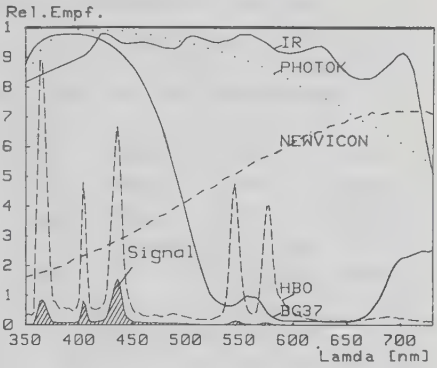
Filter Schott BG37 in Abb. 29b dargestellt. Die resultierende Beleuchtungsintensität ist in diesem Fall 91% niedriger als für den Gelbfilter, so daß dieser Filter für die direkte Domänenbeobachtung im Kerr-Mikroskop mit dem Auge nur schlecht geeignet ist. Würde man jedoch einen blauen Interferenzfilter (z.B. NAL

422) verwenden, so wäre eine direkte Domänenbeobachtung unmöglich, da außer der fehlenden Augenempfindlichkeit das menschliche Auge im blauen Licht Objekte nur unscharf wahrnimmt.

Anders verhält sich der Fall, wenn man die Domänenstrukturen mit Hilfe des Bildverarbeitungssystems untersucht. Unter Berücksichtigung der hier relevanten Empfindlichkeitsverläufe des Nahfokusbildverstärkers (Photok.) und der Fernsehröhre (Newvicon) ergeben sich die in Abb. 30 gezeigten Spektren. Das resultierende Signal für den BG37 wäre ohne die bereits erwähnte Absorption des Glases der Linsen (Abb. 30b) nur um 28% geringer als für den GG495 (Abb. 30a). Unter Berücksichtigung dieser

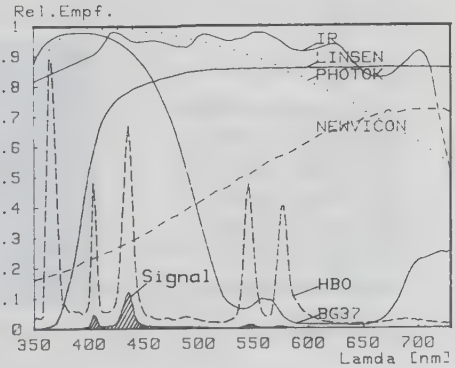


a)



b)

Abb. 30
Beleuchtungsspektrum einer HBO-Lampe unter Berücksichtigung der Kameraempfindlichkeit (PHOTOK≙Nahfokusbildverstärker, NEWVICON≙ Fernsehröhre) im Fall eines
a) Gelbfilters GG495,
b) Blaufilters BG37 und
c) Blaufilters bei Berücksichtigung der Absorption durch die Mikroskoplinsen (angenommene Gesamtdicke 10mm).



c)

Absorption (die Gesamtdicke der Linsen wurde zu 10mm angenommen) resultiert jedoch ein Signal, das um 68% niedriger ist als im Fall des Gelbfilters (Abb. 30c). Bei Verwendung des Interferenzfilters NAL 422 wäre ein weiterer Intensitätsverlust von 60% hinzunehmen, sodaß der BG37 für Untersuchungen im blauen Licht am besten geeignet ist. Durch Verwendung spezieller UV-durchlässiger Linsensysteme könnte man das in Abb. 30b ermittelte Signal ausnutzen /27/ und damit das Auflösungsvermögen noch einmal um ca. 10% steigern.

Bei Domänenuntersuchungen mit dem Bildverarbeitungssystem ist es also möglich, die Probe mit blauem Licht zu beleuchten, um das Auflösungsvermögen des Gesamtsystems zu erhöhen. Dieser Sachverhalt wird deutlich durch ein Experiment bestätigt, das im Zusammenhang mit der Untersuchung von CoCr-Schichten (Kap. VI) durchgeführt wurde. Es wurden die Domänenstrukturen einer Schicht, die in einem bezüglich der Oberfläche vertikalen Feld entmagnetisiert wurde, sowohl im gelben (Abb. 31b) als auch im blauen Licht (Abb. 31a) betrachtet und mit Hilfe eines stereologischen Verfahrens /28/ die Domänenweite bestimmt. Im Fall b) ergibt sich eine scheinbare Domänenweite von (0.19±0.01) um, während sich im Fall a) herausstellt, daß die wahre Domänenweite (0.157±0.005) um beträgt.

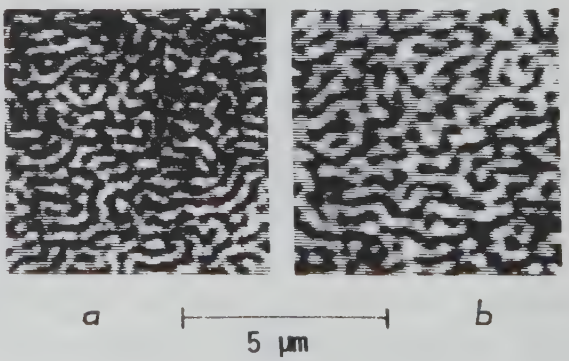


Abb. 31
Vergleich der Auflösung für blaues (a, BG37) und gelbes Licht (b, GG495) am Beispiel der vertikal entmagnetisierten Domänenstruktur einer CoCr-Schicht (Probe #1: 20 at-% Cr, Dicke h=622 nm)

Während dieser Versuche im blauen Licht stellte sich heraus, daß bei Strukturen, die sich oberhalb der Auflösungsgrenze befinden, die Domänenbilder im gelbgrünen Licht einen brillanteren Kontrast zeigen. Das ist eventuell darauf zurüchzuführen, daß die $\lambda/4$-Interferenzschicht nicht in blauem Licht, sondern herkömmlich bei gelber Beleuchtung aufgedampft wurde. Eine weitere Ursache könnte die geringere Intensität im Vergleich zum gelben Licht sein. Um das Arbeiten mit dem "Auge" auch bei Untersuchungen im blauen Licht zu ermöglichen, was vor allem zum Fokussieren und Justieren der Probe wichtig ist, wurde ein Gelbfilter im "Augenstrahlengang" vor den Okularen fest installiert, während der Filter für die Kamera ausgewechselt werden kann.

Für bestimmte Materialien wie z.B. Ferrite kann es sinnvoll sein, ebenfalls mit blauem Licht zu arbeiten. Bei den Ferriten ist der Anteil des linear polarisierten Lichts am Kerr-Effekt in der Umgebung von 400nm maximal, der des elliptisch polarisierten Lichts sehr gering, was eine Beobachtung der Domänen ohne zusätzliche Hilfsmittel ermöglicht. Im Gegensatz dazu ist der lineare Anteil in der Umgebung von 550nm minimal, der elliptische aber sehr groß, sodaß eine Domänenbeobachtung im gelben Licht nur mit Hilfe eines Kompensators möglich ist. Ein Beispiel für eine Domänenstruktur eines solchen Mn-Zn-Ferrits, die von R. Schäfer im blauen Licht aufgenommen wurde, ist in Abb. 32 gezeigt. Diese Probe wurde uns von Herrn Dr. J. W. Martens von den Philips Forschungslaboratorien, Eindhoven, zur Verfügung gestellt. Solche komplexen Domänenstrukturen konnten bisher auf Ferriten mit magnetooptischen Methoden nicht beobachtet werden und sind bisher kaum zu verstehen. Eine quantitativen Bestimmung der Magnetisierungsrichtung (/22/, s. Kap. V.5) könnte hier wertvolle Aufschlüsse liefern.

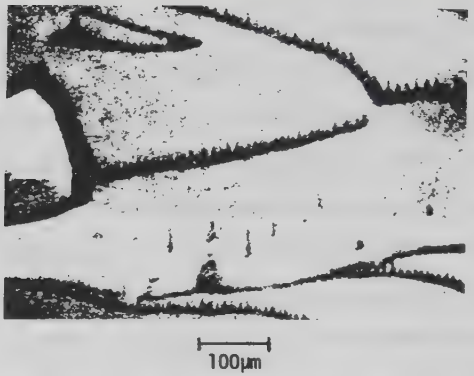


Abb. 32
Domänenstruktur eines Mn-Zn-Ferrits ($Mn_{.60}Zn_{.34}Fe_{2.06}O_4$, Philips Forschungslaboratorien, Eindhoven Aufnahme R. Schäfer).

IV.3.2 Störungen des Kerr-Effekts

Während der Untersuchung der CoCr-Schichten zeigten sich Störungen des Kerr-Effekts, die die Möglichkeiten zur Untersuchung einschränken.

Rauhe Probenoberflächen

Bei der Untersuchung der CoCr-Schichten wurde eine deutliche Abhängigkeit des Domänenkontrasts vom verwendeten Probensubstrat festgestellt. Da beim Aufsputtern der CoCr-Schichten Unebenheiten der Oberfläche des Substrats auf die Schichtoberfläche "abgebildet" werden, entstehen bei ungenügend polierten Substraten Rauhigkeiten, die als Streuzentren des Lichts wirken und den Kerr-Effekt stören. Bei Untersuchungen mit höchster Auflösung wie bei den CoCr-Schichten behindern gerade Störungen der Oberfläche, die in der selben Größenordnung wie die Domänenweiten liegen, den Kerr-Effekt. Die Oberfläche der in Abb. 33 gezeigten CoCr-Probe (BASF AG, Ludwigshafen) ist so stark gestört, daß im Sättigungsdifferenzbild (Abb. 33a) die Domänen nur andeutungsweise zu erkennen sind. Um mit dieser Methode Domänen auf einer so stark gestörten Oberfläche sichtbar zu machen, ist es notwendig,

das Gesamtsystem so weit zu stabilisieren, daß auch diese Oberflächenfehler im µm-Bereich bei der Differenzbildung völlig beseitigt werden. Bei dieser Probe ist es durch Aufnahme eines Wechselfeld-Referenzbildes (Abb. 33b) gelungen, die Verschiebungen aufgrund magnetischer Kräfte auszugleichen und die Domänen deutlich sichtbar zu machen.

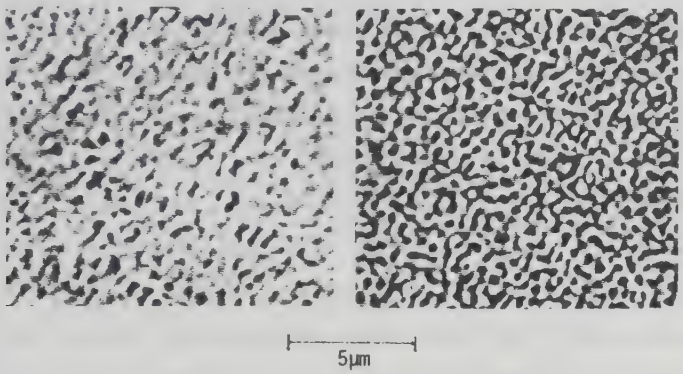


Abb. 33
a) Sättigungs-Differenzbild einer CoCr-Schicht (BASF AG): aufgrund der stark gestörten Oberfläche sind die Domänen nur andeutungsweise zu erkennen.
b) Wechselfeld-Differenzbild derselben Probenstelle: mit dieser Methode wird der Untergrund relativ gut beseitigt, die Domänenstruktur ist deutlich zu erkennen.

Faraday-Effekt im Immersionsöl

Bei den Untersuchungen der CoCr-Schichten, die bei höchster Auflösung mit einem Immersionsölobjektiv der numerischen Apertur A=1.25 durchgeführt werden, zeigte sich eine weitere Störung des Kerr-Effekts: bei den starken vertikalen Feldern bis zu 1000kA/m, die zum Sättigen der Proben nötig sind, tritt im Immersionsöl ein Faradayeffekt auf, der die Polarisationsebene des Lichts um einen dem angelegten Feld proportionalen Winkel dreht. Diese Drehung kann zwar durch Nachregeln des Analysators bzw. Polarisators kompensiert werden, solange dies aber manuell erfolgt, ist die Beobachtung dynamischer Magnetisierungsprozesse

nur eingeschränkt möglich und außerdem muß man die Gefahr einer irreversiblen Verrückung bezüglich des Referenzbildes in Kauf nehmen. Dieses Problem ließe sich mit einer magnetfeldabhängigen Steuerung des Analysators beheben.

Dieser Faraday-Effekt im Immersionsöl spielt nur bei diesen hohen Feldstärken eine Rolle. In den sonst für die meisten Untersuchungen benötigten horizontalen Feldern bis maximal 100kA/m konnte keine Beeinflussung durch einen Faraday-Effekt im Immersionsöl oder in den Linsen /22/ festgestellt werden.

V. Beispiele für die Leistungsfähigkeit des Systems

V.1 Magnetisierungsstrukturen von Siliziumeisen-Proben

Die Abb. 34 zeigt eine hochauflösende Aufnahme (numerische Apertur des verwendeten ölimmersions-Objektivs A = 1.25) der Domänenstruktur eines nicht-orientierten Dynamoblechs, das elektrolytisch poliert und anschließend wie alle Proben mit einer $\lambda/4$-Interferenzschicht (ZnS) bedampft wurde. Die sehr feine Domänenstruktur, die aufgrund einer starken Fehlorientierung entsteht, war mit magnetooptischen Methoden bislang nicht zu sehen. Das Differenzbild wurde durch Subtraktion des Originalbildes vom gesättigten Referenzzustand gewonnen. Die Mittelungstiefe N betrug 100 Mittelungen bei einem eingestellten Offset P von 1.6% der maximalen Intensität. Betrachtet wurden die Bits 2-9, d.h. im Vergleich zum einkommenden Bild, das die Bits 7-14 belegt, bedeutet das eine Verstärkung um den Faktor 2^5 (S = 5). Diese Parameter sind im Folgenden in den jeweiligen Bildunterschriften angegeben.

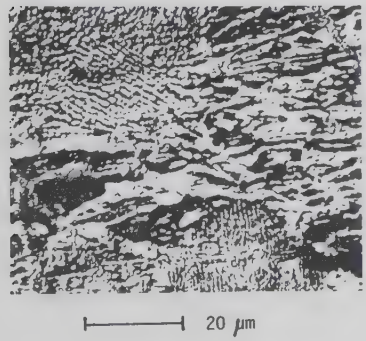


Abb. 34
Domänenstruktur eines nicht-orientiertes SiFe-Blechs (N=100, P=1.6%, S=5, A=1.25).

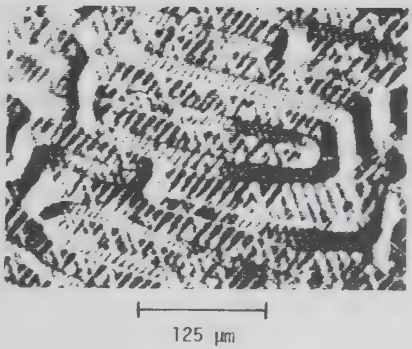


Abb. 35
Spannungsmuster auf einem verformten FeSi-Blech (N=100, P=3.2%, S=3, A=0.35).

Aufgrund starker mechanischer Verspannungen zeigen sich bei dem Transformatorenblech der Abb. 35 Spannungsmuster 2. Art. Diese Verspannungen waren so groß, daß diese Probe in einem Feld von 80 kA/m nicht mehr zu sättigen war. Daher wurde das Differenzbild mit einem Wechselfeld-Remanenzbild aufgenommen. Viele Einzelheiten dieser sehr komplexen Struktur sind selbst bei dieser geringen Vergrößerung klar erkennbar.

In Abb. 36 ist die remanente Domänenstruktur eines kornorientierten Transformatoren-Blechs mit 0.7^{o} Fehlorientierung dargestellt, das punktuell mit einem Laserstrahl behandelt worden war. Die auf diese Weise lokal eingebrachten mechanischen Spannungen bewirken eine Domänenverfeinerung und somit eine Verringerung der Verluste des Materials /29/ (Die so behandelte Probe wurde uns von T. Nozawa, Nippon Steel Corp., zur Verfügung gestellt). Die Umgebung solcher Laserpunkte der 0.15 μm dicken Probe ist in Abb. 36a gezeigt. Nähere Einzelheiten der aufgespaltenen Domänenstruktur zwischen zwei Punkten sind bei etwas höherer Auflösung gut zu erkennen (Abb. 36b). Zwar waren die Magnetisierungsstrukturen zwischen solchen Spannungszentren wie etwa auch Kratzern beobachtbar /30/, jedoch konnten die Feinheiten an den Grenzen der Störungen bisher nicht sichtbar gemacht werden. Mit der in Tiefen von einigen μm empfindlichen Rasterelektronen-Mikroskopie sind sie nicht zu erkennen /29/, da es sich wohl um Strukturen handelt, die auf die oberflächennahen Bereiche begrenzt sind.

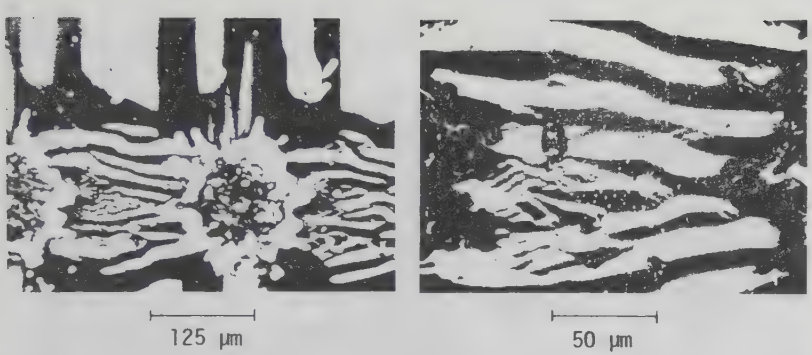
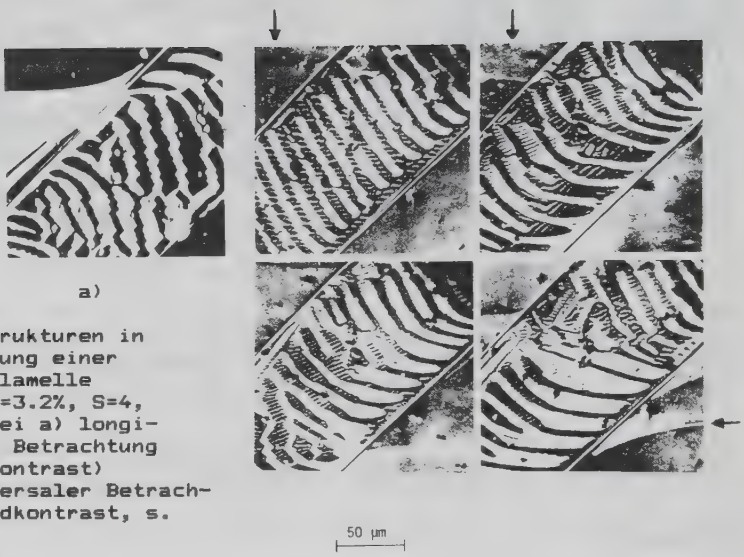


Abb. 36
Durch Laserbestrahlung beeinflußte Domänenstruktur eines kornorientierten Trafoblechs mit einer Fehlorientierung von 0.7° (N=100, P=3.2%, S=3) bei einer Apertur von 0.35 (a) und 0.85 (b).

V.2 Domänen auf verschiedenen nickelhaltigen Proben

NiFe-Blech

Verschiedene Zustände einer Domänenstruktur eines NiFe-Blechs mit 60% Ni in einer Zwillingslamelle und deren Umgebung sind in Abb. 37 dargestellt. In Abb. 37a wurde wie üblich der longitudinale Kerr-Effekt verwendet. In Abb. 37b dagegen wurden Analysator und Polarisator so eingestellt, daß die horizontal magnetisierten Domänen außerhalb des Zwillings nur noch einen geringen Kontrast zeigen (transversaler Kerr-Effekt). Auf diese Weise werden innerhalb der fehlorientierten Lamelle zusätzliche Einzelheiten der feinen Domänenstruktur beobachtbar (vgl. Kap. II.3), außerhalb des Zwillings sind die internen Strukturen der Blochwände zu sehen. Mit dieser Methode konnten Wandkontraste sowohl in dünnen Schichten (z.B. NiFe-Magnetkopfelemente) als auch in massiven Materialien (siehe auch Kap. V.4) erstmalig dargestellt werden /31/.



a)

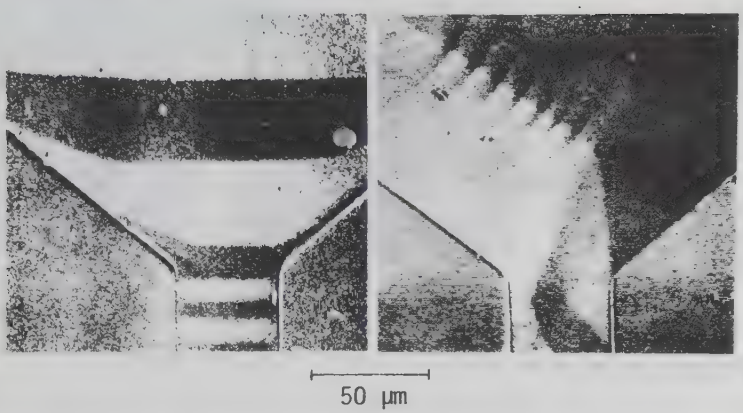
b)

Abb. 37
Domänenstrukturen in der Umgebung einer Zwillingslamelle (N=100, P=3.2%, S=4, A=0.85) bei a) longitudinaler Betrachtung (Domänenkontrast) b) transversaler Betrachtung (Wandkontrast, s. Pfeil)

Dünnschichtelemente

In Abb. 38 sind die Magnetisierungsstrukturen dünner Vacoperm-Schichten, die zur Herstellung von Magnetköpfen in der Dünnfilm-Technologie verwendet werden, dargestellt. Diese Laborproben wurden uns von J. Kollmann vom Lehrstuhl für Technische Elektronik der Technischen Fakultät Erlangen zur Verfügung gestellt. Im Fall der ersten Schicht (Dicke h=100nm) erkennt man an den verschiedenen Graustufen unterschiedliche Magnetisierungsrichtungen (Abb. 38b). Die Probe zeigt also keinerlei magnetische Anisotropie. Außerdem werden hier erstmalig die an sogenannten Stachelwänden (cross-tie walls) auftretenden verschiedenen Magnetisierungsrichtungen anhand der Graustufenunterschiede sichtbar gemacht. Diese Stachelwände entstehen in dünnen Schichten aus energetischen Gründen /32/. Diese Probe ist also aufgrund der fehlenden Anisotropie als Magnetkopfelement ungeeignet. Anders verhält es sich bei der 200nm dicken Schicht der Abb. 38a, die

eine Anisotropie quer zum Kopfelement aufweist.



a) b)

Abb. 38
Differenzbilder (N=100, P=3.2%, S=3, A=0.85) zweier Vacoperm-schichten unterschiedlicher Dicke: a) h=200nm, b) h=100nm.

NiCoP-Schichten

Die Wandkontraste der bereits in Abb. 28 vorgestellten Zick-Zack-Domänen auf einer NiCoP-Schicht, die an einem Fremdsystem aufgenommen wurden, wurden von M. Labrune mit unserem System untersucht, wobei wieder der transversale Kerr-Effekt ausgenutzt wurde (Abb. 39). Diese Zick-Zack-Strukturen bilden sich in diesen longitudinalen Aufzeichnungsmedien jeweils zwischen entgegengesetzt magnetisierten Bereichen aus, um Streufelder zu verringern. Liegt kein transversales Feld H_t an der Probe an, so bilden sich Blochwände aus. In der Abb. 39 sind für diesen Fall (mittleres Bild) deutlich Kontrastwechsel innerhalb der Wand zu erkennen. Bei Anlegen eines transversalen Feldes H_t entstehen Néelwände, die in verschiedenen Richtungen des Feldes H_t den Kontrast wechseln.

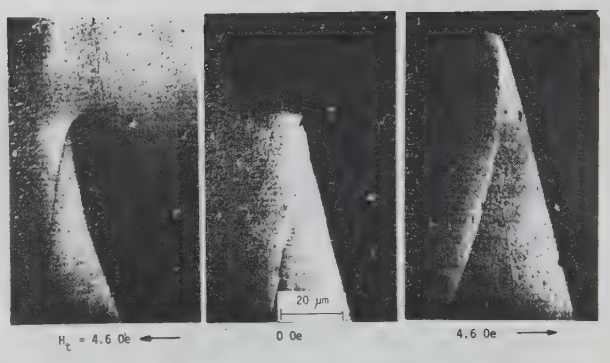


Abb. 39
Sättigungsdifferenzbilder einer NiCoP-Schicht: die Zick-Zack-Domänen wurden durch Anlegen der angegebenen Felder bewegt (H_t: transversales Feld; Aufnahme: M. Labrune).

Permalloy-Proben

In Abb. 40 sind verschiedene Magnetisierungszustände eines Wickelkerns aus Ultraperm 10 (VAC GmbH, Hanau) im optimal getemperten Zustand dargestellt. Zur Beobachtung wurde ein Ausschnitt der Probe elektrolytisch poliert und dann mit einer ZnS-Schicht bedampft. Das Referenzbild wurde bei einem anliegenden

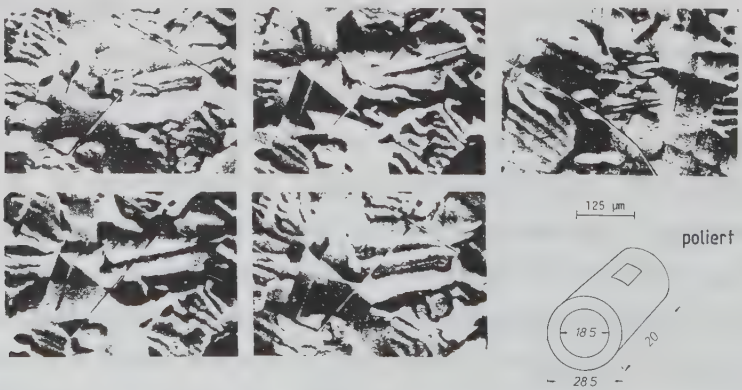


Abb. 40
Magnetisierungsstrukturen auf einem gewickelten Permalloykern (Ultraperm 10, VAC; N=100, P=1.6%, S=4, A=0.35; von R. Schäfer).

Wechselfeld aufgenommen. In dieser Aufnahme sind ebenfalls Details der Domänenstrukturen zu erkennen. Bisher war es praktisch unmöglich, Bilder von Domänen in massivem Permalloy magnetooptisch zu untersuchen. Auch die Bitterstreifentechnik versagte

bislang vollständig bei diesen Materialien. Die Aufnahmen der Abb. 40 wurden von R. Schäfer aufgenommen /33/, wobei noch besonders hervorzuheben ist, daß diese Magnetisierungsstrukturen direkt auf einem polierten Ausschnitt der gewölbten Oberfläche des Ringkerns beobachtet und aufgenommen wurden. Es ist also in diesem Fall mit Hilfe des Bildverarbeitungssystem möglich, die Domänen auf der Oberfläche des nahezu unzerstörten Bauteils (wenn man von der Politur absieht) zu untersuchen und eventuell mit dem Magnetisierungsverhalten im abgewickelten Zustand zu vergleichen.

Die gegenwärtigen Grenzen des Systems werden im nächsten Fall ähnlich wie bei Abb. 33 aufgezeigt. In Abb. 41 ist die Oberfläche einer 15µm dicken Folie aus Permalloy im ungetemperten Zustand sowohl in Remanenz (a) als auch in Sättigung (b) dargestellt. Diese Probe wurde nicht poliert, sondern nur mit einer Interferenzschicht bedampft. Daher ist die Untergrundstruktur so stark ausgeprägt, daß sie trotz Differenzbildung nicht beseitigt werden kann. Zur Unterscheidung des magnetischen Kontrasts vom Untergrund ist es deshalb nötig, den gesättigten Zustand zum Vergleich mit abzubilden.

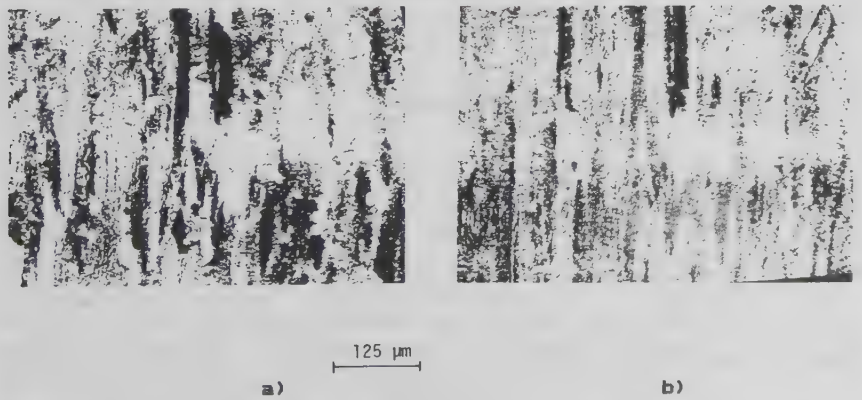


Abb. 41
Andeutungsweise sichtbare Domänenzustände auf einer ungetemperten Permalloy-Folie der Dicke 15µm: a) in der Remanenz und b) in der Sättigung (A=0.35, N=100, P=1.6%, S=3).

V.3 Untersuchung von Kobalteisen

In Abb. 42 sind zwei unterschiedliche Magnetisierungszustände eines polykristallinen CoFe-Blechs bei höchster Auflösung im ungetemperten Zustand zu sehen. Diese Bleche werden wegen ihrer hohen Sättigungsmagnetisierung bis 2.45 Tesla vor allem als Kernbleche in leichten Elektromotoren eingesetzt. Alle sichtbaren Kontraste der beiden Aufnahmen sind magnetischen Ursprungs. Diese ungewöhnlich feinen und zerfransten Domänen konnten bisher nie beobachtet werden.

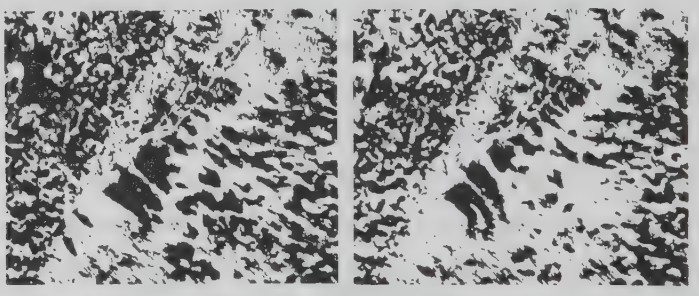


Abb. 42
Domänen eines ungetemperten CoFe-Blechs bei unterschiedlichen Feldstärken (N=100, P=1.6%, S=3, A=1.25)

V.4 Amorphe metallische Legierungen

Metallische Gläser mit etwa 70% Kobalt sind ausgezeichnete weichmagnetische Werkstoffe, da sie keine Kristallanisotropie und nur eine verschwindend kleine Magnetostriktionskonstante besitzen. Allerdings waren die Domänen aufgrund der geringen Sättigungsmagnetisierung von etwa 0.7T und der damit verbundenen geringen Kerr-Drehung bisher nur andeutungsweise zu beobachten. Mit Hilfe der Bildverarbeitung ist es nun möglich, klare Domänen-

bilder zu erhalten. Selbst in diesem Material können jetzt Wandstrukturen bei transversaler Betrachtung sichtbar gemacht werden (Abb. 43). Beide Aufnahmen zeigen die gleiche Stelle bei unterschiedlichen, in Bandquerrichtung angelegten Feldern. Deutlich sind die Übergänge zwischen unterschiedlich orientierten Blochwänden anhand der schwarzen und weißen Wandkontraste zu erkennen.

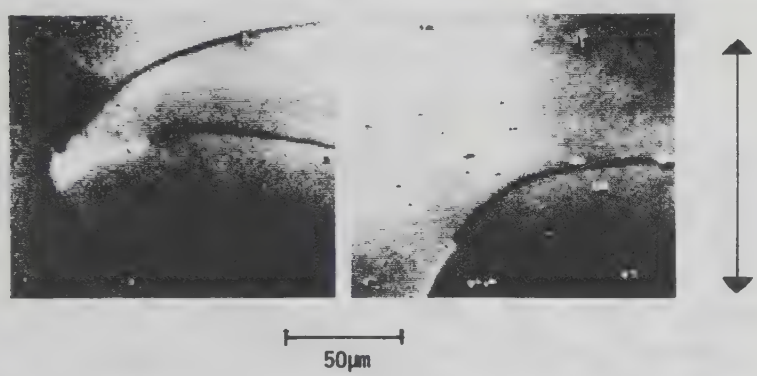


Abb. 43
Domänen auf einer unbehandelten und unpolierten Oberfläche eines magnetostriktionsfreien metallischen Glases mit 35 µm Dicke (VITROVAC 6030, Vacuumschmelze GmbH, Hanau) in einer hochauflösenden Aufnahme (A=0.85, N=100, S=4, P=1.6%).

In Abb. 44 ist die Rückseite eines eisenreichen metallischen Glases dargestellt. Diese Seite, die ja beim Abschrecken mit der Kupferrolle in Berührung war (Schmelz-Spinn-Verfahren), weist eine Vielzahl von Spuren auf, die auf eingefangene Gasblasen zurückzuführen sind. Im Originalbild (Abb. 44b) sind aufgrund dieser Untergrundstruktur keinerlei magnetische Kontraste zu erkennen. Die beste Verringerung des durch die "Luftlöcher" bedingten Untergrundkontrasts wurde mit der Wechselfeld-Referenzbild-Methode erreicht. Zwar werden nicht alle Spuren des Untergrundes eliminiert, trotzdem sind die Domänenstrukturen eindeutig zu erkennen (Abb. 44a). Bemerkenswert ist, daß in den großen Längsdomänen Keime entgegengesetzter Magnetisierung existieren, die an den Spuren der Luftblasen haften.

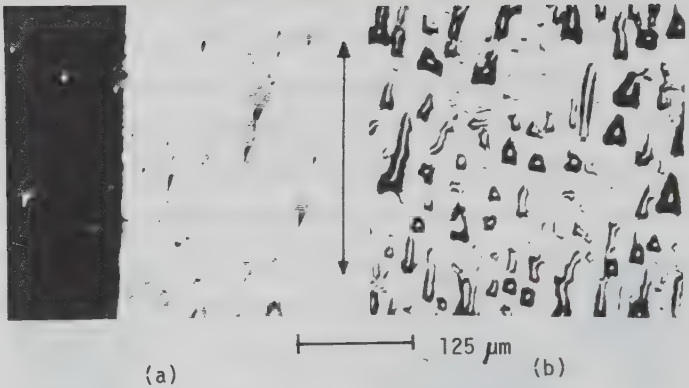


Abb. 44
Domänen auf der Rückseite eines metallischen Glases $Fe_{78}Si_9B_{13}$ mit 40 µm Dicke. Im Originalbild sind ausschließlich Untergrundkontraste zu sehen, lediglich bei dynamischer Betrachtung sind die Domänen in Bewegung zu erkennen.

V.5 Verarbeitung des digitalen Bildinhalts im Computer

Das digitale Bildverarbeitungssystem bietet eine weitere wichtige Möglichkeit: den Zugriff über einen Computer. Einerseits läßt sich über eine geeignete Schnittstelle das gesamte System mit Hilfe geeigneter Software automatisch steuern, was besonders für zeitaufwendige Messungen wichtig ist. Gleichzeitig hat man andererseits die Möglichkeit, direkt Information aus den Speichern herauszulesen und auf einem Massenspeicher abzulegen bzw. in die Speicher hineinzuschreiben. Bei Verwendung einer Speicherebene als Overlay-Ebene ist so die Beschriftung und Markierung der Bilder (z.B. Maßstab, Richtungspfeile, Markierung von ausgewerteten Bildfeldern etc.) möglich. Die notwendige freie Speicherebene steht aus Gründen zur Verfügung, die im Kapitel III.2 erläutert sind.

Auf diese Weise läßt sich das Bildverarbeitungssystem auch als quantitativ arbeitendes Meßsystem einsetzen. W. Rave hat

in seiner Diplomarbeit /22/ erste Versuche zur Bestimmung von Magnetisierungsstrukturen durchgeführt. Ausgangspunkt war die Beobachtung, daß die Aufnahme einer Domänenstruktur in longitudinaler Betrachtung (Abb. 45 a) eine andere Information liefert als die transversale Betrachtung derselben Struktur (Abb. 45 b, die Probe ist einfach um 90 Grad gedreht worden). Die transversale Aufnahme zeigt im Gegensatz zur longitudinalen eine Modulation der Magnetisierung. Diese Domänenstrukturen wurden von W. Grimm aufgenommen.

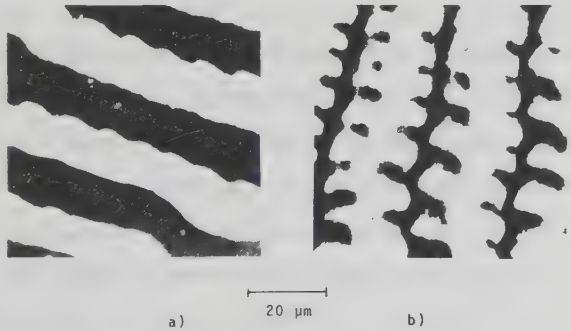


Abb. 45
Magnetostriktionsfreie amorphe Legierung (Vitrovac 6030, Vacuumschmelze GmbH, Dicke 30µm) in longitudinaler (a) und transversaler (b) Betrachtung (von W. Grimm).

Bei einfacheren Domänenstrukturen konnte bereits mit der quantitativen Auswertung erfolgreich begonnen werden /22/. Mit Hilfe eines ausreichend dimensionierten Computers (genügend Speicherkapazität, hohe Rechnergeschwindigkeit, Massenspeicher für einige Bilder, hochauflösender Drucker) in Verbindung mit einem schnellen Interface, das mit dem vorhandenen Speicherzugriff kompatibel ist, sollte es möglich sein, komplizierte Magnetisierungsstrukturen wie die der Abb. 45 quantitativ zu untersuchen und eventuell mit Hilfe von Modellrechnungen ins Probeninnere zu extrapolieren.

VI. Untersuchungen an Schichten für die senkrechte Aufzeichnung

VI.1 Einführung

Die magnetische Aufzeichnung ist das populärste Verfahren zur Speicherung großer Datenmengen, wozu bis heute üblicherweise longitudinale Speichermedien verwendet werden. Um hier eine hohe Aufzeichnungsdichte zu realisieren, ist es nötig, die Koerzitivfeldstärke des Mediums zu erhöhen sowie dessen Dicke zu verringern. Der Stand der Technik liegt heute bei Schichtdicken herunter bis 0.2µm und Koerzitivfeldstärken von etwa 50 bis 60 kA/m /34/. Je weiter diese Entwicklung fortschreitet, umso mehr nähert man sich den praktischen Grenzen, die durch die Abnahme des remanenten Signals gegeben sind.

Daher versucht man seit Mitte der siebziger Jahre die Aufzeichnungsdichte durch Verwendung senkrechter Aufzeichnungssysteme zu erhöhen. Diese werden durch Verwendung einer Aufzeichnungsschicht mit hoher senkrechter Anisotropie und neuartiger Magnetkopftypen realisiert /35,36/. Favorisiert werden im Augenblick Aufzeichnungsschichten aus CoCr-Legierungen, die ca. 15% bis 20% Chrom enthalten, da der Chrom-Zusatz die magnetischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften dieser Schichten im Vergleich zu reinen Kobaltschichten verbessert. Die senkrechte Anisotropie dieser Schichten stellt sich durch die starke Kristallanisotropie der beim Aufsputtern entstehenden hexagonalen Kristallsäulen ein /37/. Die Orientierung dieser Kristallsäulen läßt sich durch Variation der Sputterparameter, die Koerzitivfeldstärke durch Regeln der Substrattemperatur in einem weiten Bereich von etwa 10 bis 100 kA/m verändern /38/.

VI.2 Problemstellung

Ausgangspunkt für die Untersuchungen an CoCr-Schichten war eine weltweite Kontroverse über die in diesen Medien stattfindenden Magnetisierungsprozesse. Typische Hystereseschleifen dieser Schichten, wie sie in Abb. 47 und folgenden dargestellt sind, zeigen ein makroskopisch kontinuierliches Verhalten. Aus diesen Magnetisierungskurven erhält man jedoch keine Auskunft darüber, ob die mikromagnetische Magnetisierung durch Umklappen einzelner Kristallsäulen (Partikelmodell, Abb. 46a) oder durch Wandbewegung (Kontinuumsmodell, Abb. 46b) erfolgt. Aufgrund der ausgeprägten Säulenstruktur der hexagonalen Kristalle dieser Schichten wurde von vielen Seiten angenommen, daß diese Säulen aufgrund einer Segregation von Chrom an den Korngrenzen untereinander magnetisch isoliert und entkoppelt sein müßten. Die ersten Versuche zur Untersuchung der magnetischen Strukturen wurden in Elektronenmikroskopen durchgeführt. Aufgrund der Tatsache, daß dort nur sehr dünne Proben für Durchstrahlaufnahmen untersucht werden konnten und es sowieso sehr schwierig ist, die Probe im Elektronenmikroskop einem Magnetfeld auszusetzen, konnten aus diesen Beobachtungen keine Aufschlüsse über das Magnetisierungsverhalten gewonnen werden /39-41/.

Wielinga et al. /42,43/ fanden einen ersten Hinweis auf einen kontinuierlichen Charakter dieser Medien. Sie verglichen die gemessene Abhängigkeit der Anfangspermeabilitäten von CoCr-Schichten unterschiedlicher Zusammensetzung als Funktion der Schichtdicke mit den für beide Modelle berechneten Werten. Dabei stellten sie fest, daß der für ein kontinuierliches Medium berechnete Anstieg der Anfangspermeabilität zu kleineren Schichtdicken hin sehr gut mit den an CoCr-Proben gemessenen Verläufen übereinstimmte. Wielinga zeigte außerdem, daß dieser beobachtete

Anstieg der Anfangspermeabilität mit den für das Partikelmodell berechneten Werten nicht in Einklang zu bringen ist /43/. Dieser Befund wurde jedoch nicht überall zur Kenntnis genommen bzw. akzeptiert, so daß eine direktere Methode zur Untersuchung der Magnetisierungsvorgänge gesucht wurde.

An dünnen Querschnitten von CoCr-Schichten wurden Untersuchungen mit Hilfe der Lorentz-Mikroskopie durchgeführt, bei denen sich domänenähnliche Strukturen zeigten /44/. Diese wurden allerdings von den Autoren so interpretiert, als würden sie das Partikelmodell bestätigen. In einer ersten Veröffentlichung /31/ wurden von uns erstmals Bilder der magnetischen Strukturen einer CoCr-Schicht gezeigt, die im Kerr-Mikroskop mit Hilfe des Bildverarbeitungssystems gewonnen wurden. Diese Aufnahmen belegten zumindest für die damals untersuchte Probe das kontinuierliche Magnetisierungsverhalten. Im Folgenden werden nun die Domänenstrukturen unterschiedlichster CoCr-Proben gezeigt, die den kontinuierlichen Charakter aller untersuchter Schichten beweisen. In letzter Zeit gelang es schließlich sowohl Wright et al. /45/ als auch Hoffmann /46/, mit einem Elektronenmikroskop mäanderförmige Domänenmuster zu beobachten, die unsere Ergebnisse bestätigen.

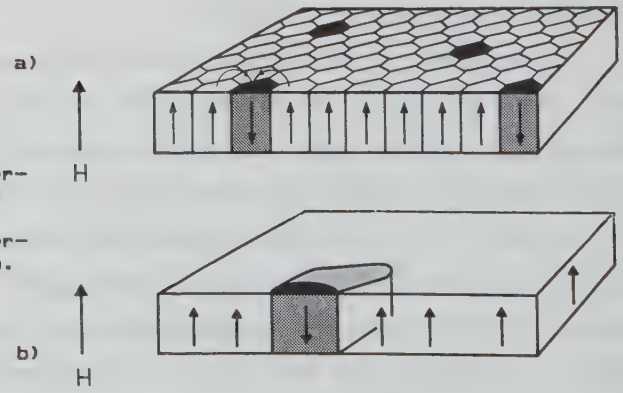


Abb. 46
Schematischer Querschnitt durch ein partikuläres (a) und ein kontinuierliches (b) Medium.

VI.3 Die zu erwartenden Magnetisierungsprozesse

In diesem Kapitel soll anhand der beiden Modelle aus Abb. 46 demonstriert werden, daß man mit Hilfe der beobachteten Magnetisierungsprozesse entscheiden kann, ob es sich um ein kontinuierliches oder partikuläres Medium handelt.

Das Partikelmodell

Die Abb. 46a zeigt den Querschnitt durch ein partikuläres Medium mit seinem säulenartigen Aufbau, der die senkrecht zur Oberfläche gerichtete Anisotropie bewirkt. Jede dieser Säulen ist magnetisch von ihren Nachbarsäulen isoliert, wenn man von einer Kopplung über das Streufeld absieht. Legt man nun ein ausreichend hohes Feld $H_\perp$ an, so werden alle Säulen einheitlich magnetisiert sein. Wird anschließend das Feld verringert, so entsteht ein Keim entgegengesetzter Magnetisierung durch die Umpolung zunächst einer einzigen Säule. Bei weiterem Absenken des Magnetfeldes stabilisiert die Kopplung mit den Nachbarn über das Streufeld die unmittelbar angrenzenden Säulen. Folglich werden entferntere Säulen solange zuerst umpolarisiert, bis sich schließlich eine "Pfeffer und Salz"-artige Magnetisierungsverteilung ausgebildet hat.

Das kontinuierliche Modell

In diesem Fall ist die Magnetschicht als kontinuierlicher magnetischer Film anzusehen (Abb. 46b). Bei Verringerung des angelegten Feldes $H_\perp$ entstehen Keime entgegengesetzter Magnetisierung, die bei einer kritischen Feldstärke durch Wandbewegung zu wachsen beginnen. Dieser Prozess ist mit dem Auswachsen von Bubbles (strip-out) in magnetischen Granatschichten zu vergleichen. Dieser kontinuierliche Magnetisierungsprozess ist also durch die Keimbildung einerseits und das Domänenwachstum anderer-

seits charakterisiert, und nicht wie im Fall des partikulären Mediums durch das Umklappen einzelner, entkoppelter Säulen.

Auf ähnliche Überlegungen stützten sich 1971 Voegeli und Friedlaender /47/ bei der Analyse von einkristallinen Gadolinium-Eisen-Granat-Filmen. Aufgrund der nahezu rechteckigen Hystereseschleife dieses Materials mußten sie allerdings ein zusätzliches horizontales Wechselfeld anlegen, um das Domänenwachstums beobachten zu können. Da im Fall der CoCr-Schichten die Hystereseschleife bei senkrechter Magnetisierung jedoch stark geschert ist, ist es lediglich notwendig, das vertikale Feld zu verringern.

VI.4 Versuchsdurchführung

Die CoCr-Proben werden wie üblich mit einer \/4-Interferenzschicht bedampft. Die benötigten hohen vertikalen Magnetfelder zum Sättigen der Proben werden mit Hilfe des bereits in Kap. III.5 gezeigten Magneten (Abb. 23) erzeugt. Die Untersuchungen werden generell mit einer Quecksilberhöchstdrucklampe entweder bei gelbgrünem oder bei blauem Licht für höchste Auflösung mit einem ölimmersionsobjektiv der numerischen Apertur 1.25 durchgeführt. Der im Immersionsöl auftretende Faraday-Effekt muß durch Nachregeln des Analysators kompensiert werden (s. Kap. IV).

Aufgrund der senkrecht zur Oberfläche stehenden Magnetisierung wird der polare Kerr-Effekt für die Domänenbeobachtung ausgenutzt, d.h. als Reflektor verwendet man im Strahlengang einen halbdurchlässigen Planspiegel. Um beste Kontrastverhältnisse zu erzielen, ist es notwendig, den Beleuchtungsstrahlengang auf etwa 20% der vollen Apertur zu begrenzen (s. Kap. I).

Für die Bedienung des Bildverarbeitungssystems ergaben

sich bei der Untersuchung dieser Schichten im Laufe der Zeit Standardwerte, mit denen die besten Resultate erzielt wurden:

- Mittelungstiefe des Referenzbildes N(Ref)=100
- Mittelungstiefe des Differenzbildes je nach Anwendung zwischen N(Dif)=1 und N(Dif)=100
- Pegelanhebung des Differenzbildes P=3.2%
- Ausgewählte Bitebene: 5 - 12 oder 4 - 11 (S=2 oder S=3).

Verwendete Proben

Es wurden in der Hauptsache CoCr-Schichten untersucht, die im Forschungszentrum der Siemens AG, Erlangen, hergestellt und charakterisiert wurden. Als Substrat für diese Proben wurde meistens poliertes Silizium, für einige Glas verwendet. Zusätzlich wurden auch Proben von S.-I. Iwasaki, Sendai, und der Leybold-Heraeus GmbH, Hanau, zum Vergleich untersucht. Die Probenauswahl erfolgte mehr oder weniger willkürlich nach dem Gesichtspunkt, ein möglichst breites Spektrum unterschiedlicher Eigenschaften zu untersuchen, um die Bandbreite des magnetischen Verhaltens zu erforschen.

Weiterhin wurden einige Proben mit ebenfalls senkrechter Anisotropie, die für die magnetooptische Aufzeichnung verwendet werden sollen, untersucht. Diese wurden uns von T. Suzuki, Sendai, und der BASF AG, Ludwigshafen, zur Verfügung gestellt.

VI.5 Ergebnisse der Domänenbeobachtung

Die Abb. 47 zeigt die Magnetisierungskurve und die dazugehörigen Domänenstrukturen einer 622nm dicken CoCr-Schicht mit 20 at-% Cr (Probe #1). Deutlich ist die Bildung magnetblasenähnlicher Keime zu sehen, wenn man das vertikale Feld $H_\perp$ von der Sättigung aus absenkt. Wird das Feld $H_\perp$ weiter verringert, so

beginnen die Keime zu wachsen und auszulaufen (strip-out), so daß man schließlich ein mäanderförmiges Domänenmuster erhält.

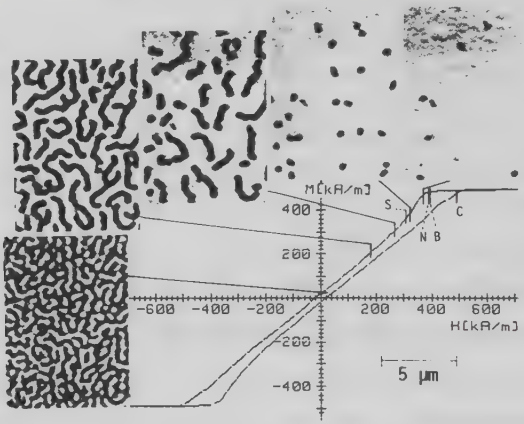


Abb. 47
Hystereseschleife und entsprechende Domänenstrukturen der Probe #1: CoCr mit 20 at-% Cr der Dicke h=622nm. Diese und die folgenden 5 Proben wurden uns von der Siemens AG zur Verfügung gestellt. Die Buchstaben "N", "C", "B" und "S" kennzeichnen Stellen, an denen charakteristische Domänenprozesse stattfinden. Diese werden im Kap. VI.6 näher erklärt.

Diese Beobachtung bestätigt ebenso wie das bereits veröffentlichte Beispiel /31/ das kontinuierliche Modell. Wie im Folgenden zu sehen sein wird, wird dieser Sachverhalt durch alle anderen Proben, die untersucht werden konnten, bestätigt.

In Abb. 48 werden die Magnetisierungskurve und die Domänen einer anderen CoCr-Schicht gezeigt. Diese Schicht weist einen um 1% höheren Chromgehalt auf und befindet sich außerdem auf einem Glassubstrat. Das Verhalten eines kontinuierlichen Mediums ist bei dieser Probe ebenfalls klar zu erkennen, wenn auch diese Probe (#2) im Vergleich zu Probe #1 deutlich weniger Keime aufweist. Betrachtet man die Hystereseschleifen dieser beiden Schichten, so besitzt die Probe #2 eine wesentlich höhere Koerzitivfeldstärke.

Ein kontinuierliches Verhalten ist auch bei den beiden nächsten Proben (#3 und #4) festzustellen, die im Vergleich zu den zwei vorherigen Proben einen geringeren Chromgehalt von 17% aufweisen (Abb. 49 und 50). Obwohl sich bei diesen beiden Proben

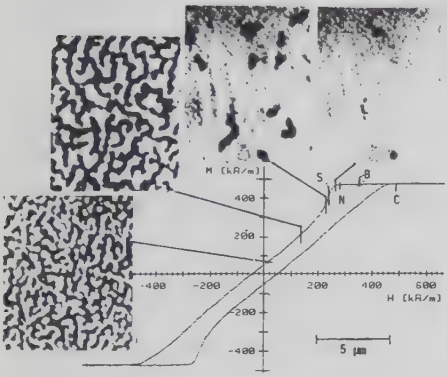


Abb.48
Probe #2: 21 at-% Cr, h=518nm
Der Hauptunterschied im Vergleich zu Probe #1 liegt in der höheren Koerzitivfeldstärke

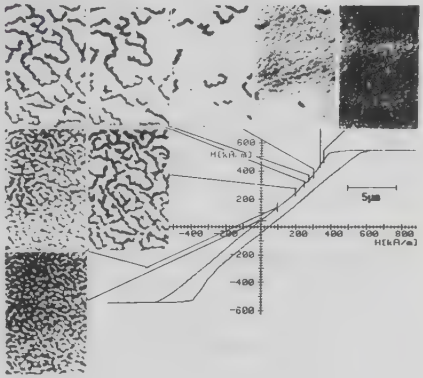


Abb. 49
Probe #3: 17 at-% Cr, h=530nm
Obwohl der Chromgehalt dieser Probe niedriger ist als bei den vorherigen, ist das Magnetisierungsverhalten ähnlich.

die Koerzitivfeldstärke ebenfalls um etwa den Faktor 2.5 unterscheidet, besteht bei der Zahl der gebildeten Keime und dem Auswachsen der Domänen kein sichtbarer Unterschied (s. auch Abb. 57). Dafür liegt aber die Koerzitivfeldstärke der Schicht #4 in der selben Größenordnung wie die der Probe #1, die jedoch eindeutig mehr Keime ausbildet. Anhand dieses Sachverhalts läßt sich erkennen, daß die Koerzitivfeldstärke keinen entscheidenden Einfluß auf das Verhalten der Domänen ausübt. Das gleiche ist wohl auch für die Schichtdicke gültig, da die Probe #3 etwa doppelt so dick ist wie die Schicht #4.

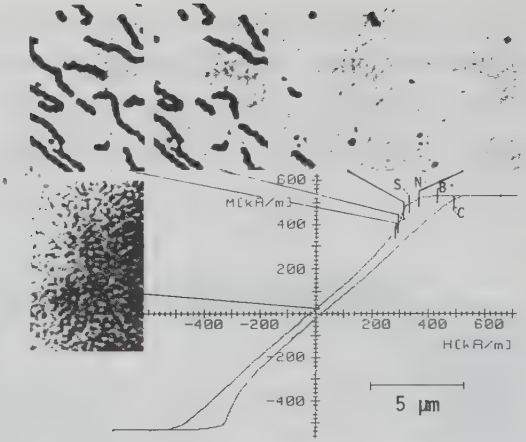


Abb. 50
Probe #4: 17 at-% Cr, h=260nm. Diese Probe zeichnet sich durch die geringe Schichtdicke und eine geringe Koerzitivfeldstärke aus.

Die Proben #1 bis #4 sind im Gegensatz zu den CoCr-Schichten #5 und #6 (Abb. 51 und Abb. 52) durch eine charakteristische Schulter in der Magnetisierungskurve gekennzeichnet, die auf eine scharfe kristallographische Textur der Säulen hinweist. Die Keimbildungsfeldstärke ist bei diesen Proben immer eng mit der Schulter korreliert, wie die vorherigen Abbildungen zeigen. Betrachtet man nun die Proben #5 und #6 so ist hier die Feldstärke, bei der die Keimbildung eintritt, nicht so genau anhand der Magnetisierungskurven zu bestimmen wie bei den anderen CoCr-Schichten. Diese Beobachtungen lassen den Schluß zu, daß die Texturschulter mit der Keimbildung entgegengesetzt magnetisierter Domänen verknüpft ist, die in besser orientierten Schichten bei genauer definierten Feldstärken eintritt. Die früher erwogene Vermutung, daß eine vorhandene Schulter ein Anzeichen für ein kontinuierliches und eine fehlende Schulter ein Indiz für ein partikuläres Medium sei /42/, wird durch diese Beobachtungen widerlegt.

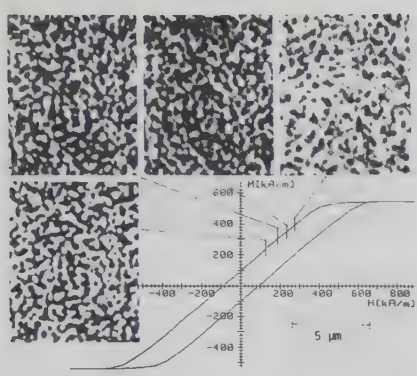


Abb. 51
Probe #5: 17 at-% Cr, h=530nm. Bemerkenswert sind die hohe Koerzitivfeldstärke von etwa 90kA/m und die in der Hystereseschleife fehlende Schulter.

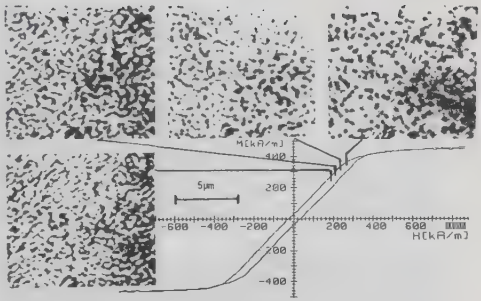


Abb. 52
Probe #6: 19 at-% Cr, h=96nm. Diese extrem dünne Probe besitzt ebenfalls keine Texturschulter in der Magnetisierungskurve.

Anhand Abb. 52 lassen sich die Grenzen des Bildverarbeitungssystems demonstrieren. Es wird die Domänenstruktur einer extrem dünnen Schicht (Probe #6) gezeigt, die auch für Untersuchungen im Elektronenmikroskop verwendet wurde /46/. Trotz erheblicher Oberflächenstörungen lassen sich die Domänen bei den angegebenen Feldern auch statisch gut beobachten. Die Domänenweite in Remanenz ist jedoch so fein, daß dort die Domänen gerade noch in Bewegung zu sehen sind, jedoch unmöglich im Standbild zu dokumentieren sind.

Um die an diesen Proben gefundenen Ergebnisse zu bestätigen, wurden zum Vergleich zwei Proben auf Polyimid-Substraten untersucht. Die eine wurde von S.-I. Iwasaki (#7), die andere von Leybold-Heraeus (#8) hergestellt. Wie in Abb. 53 klar zu erkennen ist, sind die ablaufenden Magnetisierungsprozesse im Vergleich zu den anderen Schichten im Wesentlichen identisch. Beide Schichten weisen deutlich mehr Keime als die Proben #1 bis #4 auf. Dabei fällt auf, daß die Domänen bei der Schicht #7 deutlich weniger Auswachsen als bei allen anderen Proben, was auch bei der quanti-

tativen Untersuchung dieser Schicht (Abb. 57) bestätigt wird.

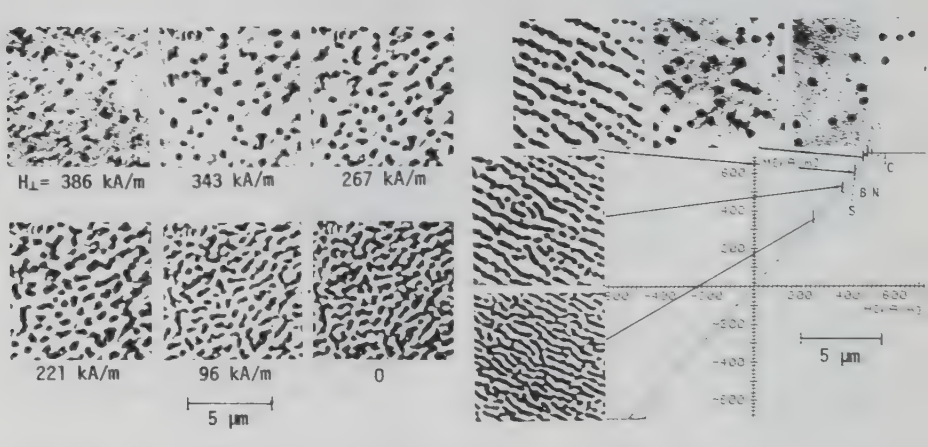


Abb. 53. Magnetisches Verhalten von zwei CoCr-Schichten auf einem Kunststoff-Substrat:
a) Diese Probe (#7, S.-I. Iwasaki) besteht aus einer 480nm dicken CoCr-Schicht, die auf einer ebenso dicken Permalloyschicht aufgedampft ist. Die Koerzitivfeldstärke beträgt 43.7kA/m, die Sättigungsmagnetisierung 0.69T (H_k=267kA/m). Das zur Sättigung benötigte vertikale Feld liegt bei 490kA/m, erste Keime werden bei 420kA/m gebildet.
b) Probe #8 (17 at-% Cr, K. Röll, Leybold-Heraeus) ist ungefähr 500nm dick. Kennzeichnend sind die hohe Anzahl von Keimen (die ersten werden bei 510kA/m gebildet) und das sehr hohe Sättigungsfeld von etwa 565kA/m.

Bei der direkten Beobachtung dynamischer Magnetisierungsprozesse der CoCr-Schichten ist das Wachsen der Domänen durch Wandverschiebung sehr gut zu verfolgen. In den oben gezeigten statischen Bildern ist dieses Verhalten bei weitem nicht so offensichtlich zu erkennen. Um daher das Auswachsen der Domänen anschaulicher darzustellen, wurde das in Kap. IV.2.3 beschriebene Domänen-Differenzverfahren angewendet (Abb. 54). Es wurde eine Magnetisierungsstruktur der Probe #1 mit bereits auslaufenden Domänen als Referenzbild aufgenommen (schwache Kontraste) und anschließend das vertikale Feld erniedrigt. Die dabei ausgelaufenen Domänen sind anhand des stärkeren Kontrasts zu erkennen (Abb.

54a). Zur besseren Orientierung ist die Domänenstruktur der Abb. 54a schematisch in Abb. 54b dargestellt. Die schwachen Kontraste der 'Referenzbilddomänen' sind hier weiß dargestellt, die ausgelaufenen Domänen sind schwarz ausgefüllt. Das kontinuierlichen Verhalten der CoCr-Schicht wird aus dieser Aufnahme klar ersichtlich.

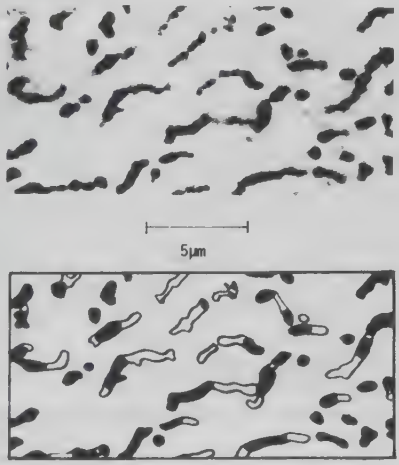


Abb. 54
Domänendifferenzbild der Probe #1: das Auslaufen der Domänen aus dem Referenzzustand (schwache Kontraste) bei Erniedrigung des vertikalen Feldes ist hier eindeutig zu sehen:
a) Originalbild
b) Schematische Darstellung.

Im Folgenden soll die Abhängigkeit des feldfreien Domänenzustandes von der magnetischen Vorgeschichte am Beispiel der Probe #1 demonstriert werden (Abb. 55). In Abb. 55a ist der remanente Zustand nach vorheriger Sättigung im vertikalen Feld zu sehen. Abb. 55b zeigt den Zustand, der sich beim Entmagnetisieren in einem Wechselfeld mit abnehmender Amplitude einstellt, während in Abb. 55c die remanente Domänenstruktur gezeigt wird, die sich nach Anwendung eines hohen vertikalen Feldes, das aber nicht zur Sättigung der Probe ausreichte, ergibt. Dieser Zustand ist in etwa mit einem Bubblegitter zu vergleichen (vgl. Abb. 59). Im Fall der Abb. 55d schließlich sind die Domänen nach Entmagnetisierung streng ausgerichtet. Diese Orientierung wurde durch leichtes Verkippen des vertikalen Feldes um ca. 1 Grad in die ausgezeichnete Richtung eingebracht.

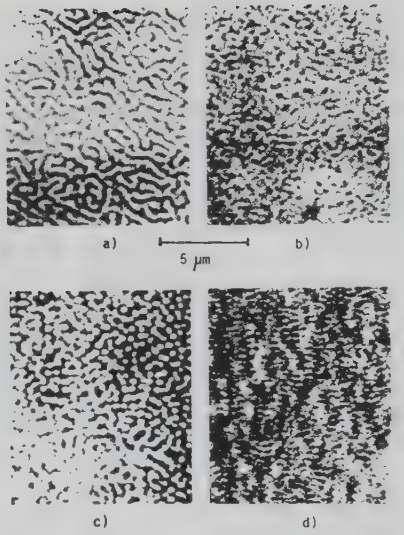
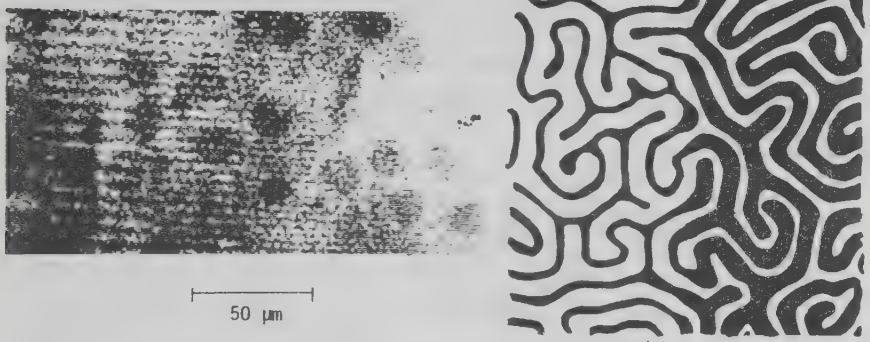


Abb. 55
Unterschiedliche remanente Zustände der Probe #1: a) Remanenz nach vorheriger Sättigung, b) entmagnetisierter Zustand, c) "Bubblegitter"-ähnlicher Zustand und d) ausgerichtete entmagnetisierte Struktur.

Während die Aufnahmen der Abb. 55a - c im gelbgrünen Licht aufgenommen wurden, wurde die Aufnahme 55d zur Verbesserung der Auflösung im blauen Licht gemacht. Diese Möglichkeit wurde bereits in Kap. IV.3.1 ausführlich am Beispiel der entmagnetisierten Domänenstruktur dieser Probe #1 demonstriert. Die Domänenweite im Fall der Abb. 55d beträgt $(0.145 \pm 0.011)\mu m$, womit die Grenze der magnetooptischen Auflösung erreicht sein dürfte. Diese Aufnahme wurde im Gegensatz zu den drei anderen mit Hilfe eines Wechselfeld-Referenzbildes gewonnen.

Eine weiterer wichtiger Aspekt im Hinblick auf die Eigenschaften der CoCr-Schichten ist die Frage, auf welche Weise die Information aufgezeichnet wird. Ein erster Hinweis ist in Abb. 56a zu finden, wo einige nebeneinanderliegende Spuren dargestellt sind, die mit unterschiedlichen Frequenzen auf eine mit CoCr beschichtete Speicherplatte geschrieben wurden. Die abwechselnden Schwarz/Weiß-Kontraste, die die Flußwechsel innerhalb der Spuren anzeigen, werden offensichtlich durch eine Modulation der Domänenstruktur verursacht. In Abb. 56b ist eine Möglichkeit, wie

diese Modulation aussehen könnte, schematisch dargestellt: Abwechselnd entgegengesetzte Flußrichtungen beim Schreiben bewirken eine abwechselnde Vergrößerung der weißen und schwarzen Domänen. Der Übergang zwischen den beiden Gebieten wurde in diesem Schema als kontinuierlich angenommen.



a) b)

Abb. 56
a) Übersicht über einige Schreibspuren auf einer CoCr-Platte. Dieses Differenzbild wurde durch Verändern der Analysatorstellung aufgenommen.
b) Schematische Darstellung einer Modulation von mäanderförmigen Domänen.

VI.6 Quantitative Auswertung der Domänenstrukturen

Um diese qualitativ erhaltenen Befunde durch quantitative Ergebnisse zu stützen, wurde die Anzahl der Domänen als Funktion des angelegten vertikalen Feldes ausgewertet. Dafür wurde jeweils der gesättigte Zustand als Referenzbild aufgenommen und dann bei den jeweiligen Feldstärken ein Differenzbild aufgenommen. Bei diesen Bildern wurde dann je Meßzyklus an einer Probe jeweils in fünf ortsfesten Quadraten mit einer Kantenlänge von 6.5µm die Anzahl der Domänen durch Auszählen bestimmt. Als Hilfsmittel dienten dazu Quadrate auf Projektionsfolien, auf denen

bereits erfaßte Domänen markiert werden konnten. Die Abb. 57 zeigt das Ergebnis für alle bisher gezeigten Proben bei Erniedrigung des Feldes von der Sättigung aus. Es ist folgendes zu beobachten: Nach Beginn der Keimbildung nimmt die Zahl der Domänen solange zu, bis bei einer kritischen Domänendichte, die wohl für jedes Material charakteristisch ist, keine weiteren Keime mehr gebildet werden, die Domänendichte also konstant bleibt. Bei weiterer Erniedrigung des Feldes wird die Domänenweite nur noch durch das im vorigen Kapitel deutlich gezeigte Auswachsen der Domänen verringert.

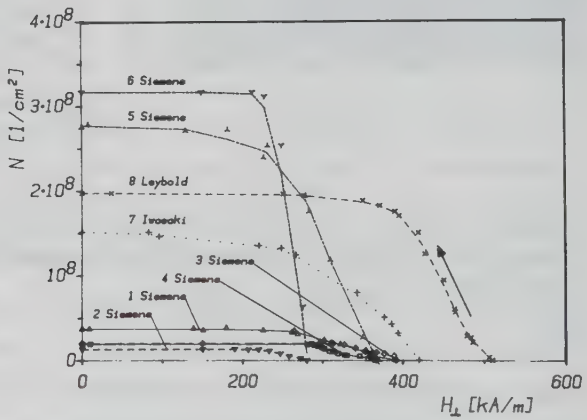


Abb. 57
Die Domänendichte bei Verringerung des angelegten Feldes, beginnend bei der Sättigung.

Im Fall einer gewöhnlichen Bubbleschicht mit ihrer geringen Koerzitivfeldstärke würde man unter diesen Bedingungen normalerweise nur einen einzigen Keim erhalten, der über die gesamte Probe auslaufen würde, um das Streufeld zu reduzieren. Im Gegensatz zu dem dabei entstehenden Labyrinth wäre bei einem partikulären Medium zu erwarten, daß sich die Anzahl der Keime solange stetig erhöht, bis sich die Keime berühren. Für diesen Fall kann man ausgehend von einem einfachen hexagonalen Modell der Kristallstruktur mit einheitlicher Korngröße (Abb. 58) die maximale Anzahl der Domänen wie folgt bestimmen:

Die entgegengesetzt magnetisierten Säulen (schwarz) sind entsprechend der in Kap. VI.3 beschriebenen "Pfeffer und Salz"- Anordnung verteilt. In diesem Modell läßt sich eine Einheitszelle durch Verbinden der Mittelpunkte dreier unmittelbar benachbarter schwarzer Säulen definieren. Ein Drittel dieser Einheitszelle wird von den schwarzen und zwei Drittel von den weißen Säulen belegt. Die maximale Domänendichte ergibt sich also aus dem Kehrwert der dreifachen Sechseckfläche zu

$$N = 2/(3\sqrt{3}\cdot a^2) \qquad (1)$$

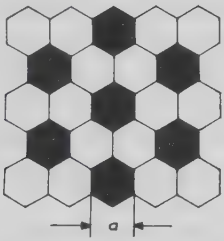


Abb. 58
Vereinfachtes Modell der Säulenstruktur einer CoCr-Schicht, das zu einem theoretischen Maximum der Domänenanzahl im partikulären Modell führt.

In der folgenden Tabelle B wird die experimentell beobachtete Domänendichte in Remanenz mit dem aus dem Partikelmodell (Gl. 1) hergeleiteten Maximalwert verglichen. Zur Abschätzung der Korngröße wurde eine Beziehung zwischen dieser Größe und der Schichtdicke verwendet, die von Lodder et al. /37/ gemessen wurde und die wohl auch für unsere Proben gültig sein sollte. Als bemerkenswertes Ergebnis dieser Gegenüberstellung in Tabelle B ergibt sich, daß trotz aller Unterschiede in der experimentell bestimmten Domänenanzahl zwischen den einzelnen CoCr-Schichten diese Werte um etwa eine Größenordnung kleiner sind als die im Fall des Partikelmodells zu erwartenden Werte.

Tabelle B: Die gemessene Domänendichte in Remanenz für die Proben #1 bis #8 im Vergleich mit den Werten für das Partikelmodell, die aus der nominellen Korngröße hergeleitet wurden, und den für das Bubblegitter-Modell ermittelten Domänendichten, die aus der remanenten Domänenweite abgeleitet wurden.

Probe	remanente Domänenweite μm	nominelle Korngröße 10^{-6}cm	Domänendichten experim. gemessen $10^6/cm^2$	theoretisch: part.Modell $10^6/cm^2$	theoretisch Bubblegitte $10^6/cm^2$
1	0.22	7.4	38	7000	329
2	0.22	6.4	13	9000	329
3	0.20	6.7	20	8500	398
4	0.17	4.0	29	24000	551
5	0.22	6.7	278	8500	329
6	----	2.0	317	96000	---
7	0.26	6.2	151	10000	235
8	0.19	6.3	196	9500	441

In der Tabelle B wird ein weiterer sehr interessanter Vergleich vorgenommen. Es ist in Spalte 6 die maximale Domänendichte für den Fall eines angenommenen Bubblegitters aufgeführt. In diesem Fall kann man um jedes Bubble ein Sechseck legen, das die doppelte Fläche des Bubbles aufweist. Die remanente Domänenweite ist dann durch das Verhältnis des Umfangs des Bubbles zur Sechseckfläche gegeben. Die maximale Domänendichte, die in Form eines Bubblegitters realisiert werden würde, läßt sich bestimmen, wenn man die Domänenweite des remanenten Zustands zugrunde legt.

Der Unterschied zwischen diesem Ergebnis und dem experimentell ermittelten Wert der Domänendichte in Remanenz (Spalte 4) stellt ein Maß für die Beteiligung des Domänenauslaufens (strip-out) am Magnetisierungsprozeß dar. In Übereinstimmung mit den qualitativen Beobachtungen weisen die Proben #1 bis #4 ein stark ausgeprägtes Auslaufen der Domänen auf, während die anderen Schichten nur einen geringen Anteil von ausgelaufenen Domänen im remanenten Zustand besitzen. Da aber selbst unter der Annahme eines reinen Bubblegitters (überhaupt kein Auslaufen der Domänen) die Anzahl der Bubbles in Spalte 4 immer kleiner ist als die durch Gl. (1) für das Partikelmodell berechnete Domänenanzahl, kann man auch in diesem Fall auf die Gültigkeit des kontinuierlichen Modells für diese Schichten schließen.

Zusätzlich zu diesen Messungen wurde die Domänendichte der Proben #4 und #8 für einen anderen Magnetisierungszyklus bestimmt: Das vertikale Feld wurde jeweils von der Remanenz aus auf bestimmte Werte erhöht und anschließend wieder auf Null geregelt und anschließend das Differenzbild aufgenommen. Dieser Vorgang wurde so lange wiederholt, bis die Sättigungsfeldstärke erreicht war. Die so eingestellte Magnetisierungsstruktur wurde gleichfalls nach dem oben beschrieben Verfahren ausgewertet. Das Ergebnis ist in Abb. 59 festgehalten.

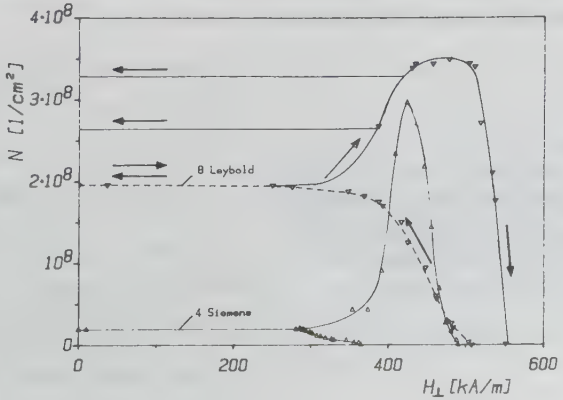


Abb. 59
Die Vervielfältigung von Domänen in von der Remanenz aus ansteigenden Feldern am Beispiel der Proben #4 und #8. Die Ergebnisse der Untersuchung im abnehmenden Feld sind gestrichelt eingezeichnet.

Für diesen Fall ist eine erhebliche Vervielfachung der Anzahl der Domänen festzustellen. Diese Vervielfältigung ist bei solchen Proben besonders stark ausgeprägt, die aufgrund eines vorherrschenden Auslaufens der Domänen in der gewöhnlichen Remanenz nur eine geringe Domänenanzahl aufweisen. Dieser Sachverhalt war qualitativ bereits in Abb. 55a und c zu erkennen. Offensichtlich tritt die Vermehrung der Domänen durch ein Aufbrechen der Streifendomänen ein. Ein Zusammenziehen der Streifendomänen wie im Fall der Bubbleschichten ist bei den CoCr-Schichten mit der höheren Koerzitivfeldstärke nicht zu beobachten. Bei weiterer Erhöhung des Feldes kollabieren die Domänen schließlich bei einer Feldstärke, die deutlich oberhalb der Keimbildungsfeldstärke liegt. Wie in Abb. 59 angedeutet, ist es auch möglich, durch definiertes Erhöhen und anschließendes Reduzieren der Feldstärke jede gewünschte Domänendichte, die zwischen dem Maximum bei abnehmenden (gestrichelte Kurve) und dem Maximum bei zunehmenden Feld (durchgezogen) liegt, einzustellen.

In den Magnetisierungskurven der Proben #1, #2, #4 und #8 (Abb. 47, 48, 50 und 53b) wurden die Punkte, an denen charakteristische Domänenprozesse stattfinden, durch Buchstaben markiert. Dabei steht "N" für Keimbildung, "C" für Kollaps, "B" für den Bubble-Zustand im Fall maximaler Domänendichte und "S" für das Auslaufen der Domänen (Abb. 60).

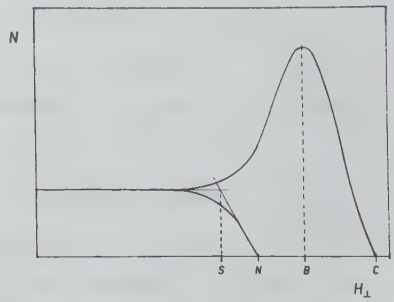


Abb. 60
Schemazeichnung zur Ermittelung der charakteristischen Feldstärken aus dem Verlauf der Domänendichte über das vertikale Feld.

Wie aus den genannten Magnetisierungskurven hervorgeht, ist die Keimbildung mit der Texturschulter verknüpft, was ja auch schon im Zusammenhang mit der Untersuchung von Proben ohne Schulter in der Hystereseschleife qualitativ diskutiert wurde. Der Kollaps der Domänen tritt immer bei Feldstärken auf, die nahe der Feldstärke liegen, bei der der untere Ast der Hystereseschleife in die Sättigung einmündet. Die maximale Domänenvervielfältigung tritt in der Regel zwischen diesen beiden Punkten auf, außer im Fall der Probe #8, bei der dieser Wert aufgrund des breiten Maximums der Domänenvervielfältigung schlecht zu definieren ist. Bezüglich des Strip-out-Feldes ist kein offensichtlicher Zusammenhang mit ausgezeichneten Punkten der Magnetisierungskurven zu erkennen.

VI.7 Magnetooptische Aufzeichnungsschichten

Zur Ergänzung wurden auch einige magnetooptische Aufzeichnungschichten /48/ untersucht, die ebenfalls eine senkrechte Anisotropie besitzen. Es handelt sich um zwei Proben, die von T. Suzuki, Sendai, hergestellt und charakterisiert wurden, und eine Probe der BASF AG, Ludwigshafen, von der keine Daten vorhanden sind.

In Abb. 61 sind die Magnetisierungskurve und die entsprechenden Domänenbilder einer $Fe_{50}Nd_{50}$-Schicht mit einer Dicke unterhalb 1μm zu sehen. Trotz eines relativ starken Untergrundkontrasts sind die Domänen recht gut zu erkennen. Wie aus den Bildern deutlich hervorgeht, handelt es sich hier ebenfalls um ein kontinuierliches Medium. Bemerkenswert ist auch die geringe Anzahl der bei der Keimbildung entstehenden Domänen, verbunden mit einem starken Auslaufen derselben.

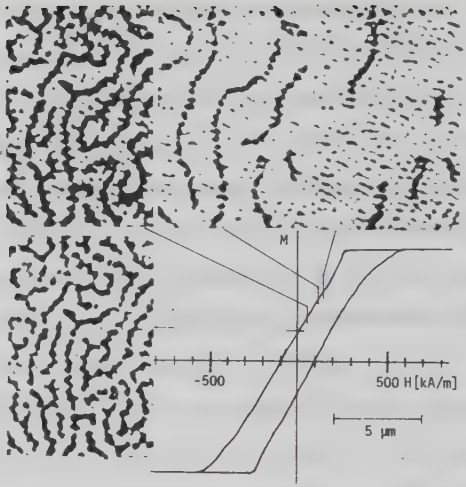


Abb. 61
Magnetisierungsverhalten einer magnetooptischen Aufzeichnungsschicht $Fe_{50}Nd_{50}$. Diese und die folgende Probe (Abb. 63) wurden uns von T. Suzuki zur Verfügung gestellt.

Ebenso wie bei den CoCr-Schichten ist bei diesen FeNd-Proben eine Vervielfältigung der Domänenanzahl festzustellen, wenn man von einem nicht gesättigten Zustand aus das vertikale Feld wieder erniedrigt (vgl. Abb. 59). Dieser Sachverhalt ist in Abb. 62 an derselben Probe demonstriert. Bei den angegebenen Feldstärken hat sich die Domänendichte um etwa eine Größenordnung erhöht, was auch ein Indikator für den hohen Anteil des Domänen-Strip-out am Magnetisierungsprozess ist (vgl. VI.6).

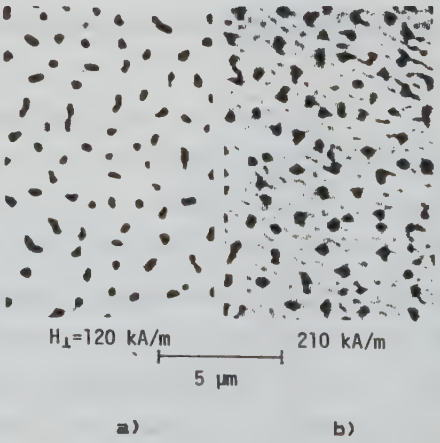


Abb. 62
Zwei Magnetisierungszustände der obigen Probe nach Absenken des Feldes von einem nicht ganz gesättigten Zustand aus. Die Zahl der Keime (b) ist im Vergleich zu Abb. 61 deutlich größer. Bei weiterer Erniedrigung des Feldes (a) wird ebenso wie in Abb. 61 die Domänenweite hauptsächlich durch Auslaufen der Domänen und nicht durch die Bildung neuer Keime verringert.

Zwei verschiedene remanente Domänenstrukturen einer weiteren Probe von T. Suzuki sind in Abb. 63 zu sehen. Diese $Fe_{65}Nd_{35}$-Schicht hat eine erheblich geringere Koerzitivfeldstärke als die andere Probe und ist außerdem noch zusätzlich mit einer SiO-Schicht bedeckt. Aufgrund der viel stärkeren Untergrundstruktur dieser Probe führte es zu keinen befriedigenden Ergebnissen, mit einem Sättigungsreferenzbild zu arbeiten. Durch Anwendung der Wechselfeld-Referenzbild-Methode gelingt es dagegen, den Untergrund fast vollständig zu beseitigen (vgl. Abb. 33).

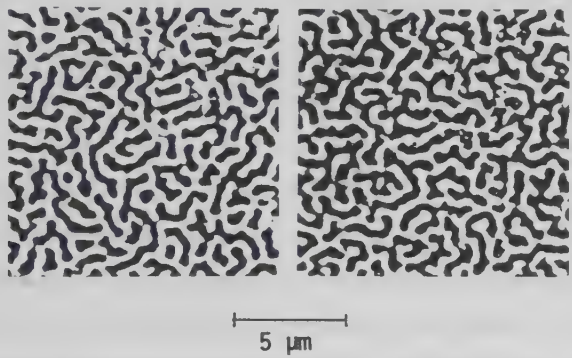


Abb. 63
Zwei unterschiedliche remanente Zustände einer $Fe_{65}Nd_{35}$-Schicht (H_c=15.9kA/m) an derselben Stelle. Die Tatsache, daß die Muster nicht identisch sind, beweist, daß es sich um magnetische Strukturen handelt und nicht um Auswirkungen der bei dieser Probe sehr stark gestörten Oberfläche.

In Abb. 64 sind sechs aufeinanderfolgende Zustände einer magnetooptischen Schicht von BASF bei identischer Feldstärke festgehalten. Diese Probe ist offensichtlich so dünn, daß keine genau definierten Domänen mehr entstehen. Die Probe wurde gesättigt und anschließend das Feld reduziert, bis sich die ersten Keime gebildet haben. Die Aufnahmen wurden dann jeweils in Abständen von 5 Minuten aufgenommen, ohne daß die Probe irgendwelchen erkennbaren veränderten Umgebungsverhältnissen ausgesetzt wurde. Die Ursache dieses Verhaltens ist ungeklärt.

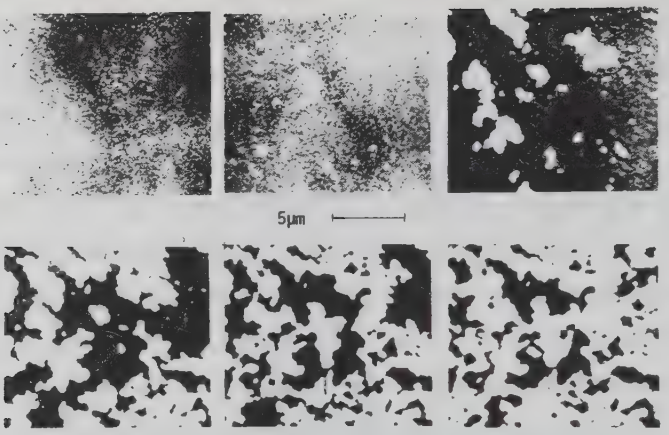


Abb. 64
Zeitliche Veränderung der Domänenstruktur einer magnetooptischen Aufzeichnungsschicht. Zwischen den Aufnahmen wurde jeweils 5 Minuten gewartet, die Probe wurde jedoch keinem Magnetfeld ausgesetzt.

Dieses Kapitel zusammenfassend kann man feststellen, daß die Untersuchungsergebnisse an CoCr-Schichten eindeutig den kontinuierlichen Charakter dieser senkrechten Aufzeichnungsmedien bewiesen haben. Dabei beeinflussen die Schichtdicke, die Koerzitivfeldstärke, der Grad der Fehlorientierung der Schicht und das verwendete Substrat den kontinuierlichen Charakter nicht, sie bewirken jedoch eine große Spannweite der magnetischen Eigenschaften innerhalb dieser Eigenschaft. Diese Parameter könnten für die Tauglichkeit dieser Aufzeichnungsschichten von entscheidender Bedeutung sein. An dieser Stelle sollten in Zukunft weitere Untersuchungen anknüpfen.

Bei den magnetooptischen FeNd-Aufzeichnungsschichten konnte ein ähnliches Verhalten wie bei den CoCr-Proben festgestellt werden, so daß auch hier auf den kontinuierlichen Charakter dieser Medien geschlossen werden kann.

VII. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Differenz-Bildverarbeitungssystem vorgestellt, mit dem die Anwendungsmöglichkeiten der magnetooptischen Beobachtungen im Kerr-Mikroskop erheblich erweitert werden. Im System werden die einkommenden Bilder elektronisch verarbeitet und abgespeichert. Der Untergrund des magnetooptischen Bildes der Probe wird durch Subtraktion eines Referenzzustandes eliminiert. Dadurch wird, ähnlich wie in der Raster-Elektronen-Mikroskopie, wo schwache magnetische Kontraste durch elektronische Bildverarbeitung zu klaren Bildern verstärkt werden /49/, eine Kontraststeigerung um eine Größenordnung erreicht, wodurch es möglich ist, magnetische Domänen bis hinunter zu 0.14µm zu beobachten. Hinzu kommt die leichte Manipulierbarkeit der Proben und eine einfache Bedienung des Systems, die durchaus einen industriellen Einsatz des Systems interessant machen könnten. Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems Kerr-Mikroskop /Bildprozessor konnte anhand von ausgesuchten Beispielen demonstriert werden. Speziell bei der Untersuchung von Schichten für die senkrechte Aufzeichnung, die heute im Mittelpunkt der Bemühungen um eine weitere Erhöhung der Speicherdichte der magnetischen Massenspeicher stehen, konnten mit Hilfe des Systems erstmalig Domänenbeobachtungen gemacht werden, die für die weitere Entwicklung von Bedeutung sein könnten. Der kontinuierliche Charakter dieser Schichten konnte eindeutig nachgewiesen werden, womit eine weltweite Kontroverse entschieden wurde.

VIII. Literaturverzeichnis

/1/ W.C.Elmore "Interpretation of Ferromagnetic Colloid Patterns on Ferromagnetic Crystal Surfaces", Phys.Rev.58, 640-642 (1940)

/2/ C.Kittel "Theory of the Formation of Powder Patterns on Ferromagnetic Crystals", Phys.Rev.76, 1877 (1949)

/3/ Y.S.Lin, D.B.Dove, S.Schwarzl and C.C.Shir "Charged Wall Behaviour in 1-um Bubble Implanted Structures", IEEE Trans. on Magn., MAG-14, 494-499 (1978)

/4/ G.C.Rauch, R.F.Krause, C.P.Izzo, K.Foster, and W.Bartlett "Enhanced Domain Imaging Techniques", J.Appl.Phys.55 (6), 2145-2147 (1984)

/5/ H.Pfützner "A New Colloid Technique Enabling Domain Observations of Si-Fe Sheets with Coating at Zero Field", IEEE Trans on Magn., MAG-17, 1245-1247 (1981)

/6/ D.J.Fathers, J.P.Jakubovics, D.C.Joy, D.E.Newbury, H.Yakowitz "A New Method of Observing Magnetic Domains by Scanning Electron Microscopy", phys.stat.sol. 20, 535-544 (1973)

/7/ W.G.Morris, J.W.Shilling, D.R.Fecich, P.Rao "Effect of Forsterite Coatings on the Domain Structure of Grain Oriented 3% Si-Fe", IEEE Trans.on Magn., MAG-14, 14-17 (1978)

/8/ T.Nozawa, T.Yamamoto, Y.Matsuo, Y.Ohya "Effects of Scratching on Losses in 3-Percent Si-Fe Single Crystals with Orientation near (110)[001]", IEEE Trans.on Magn., MAG-15, 1979

/9/ M.J.Freiser "A Survey of Magnetooptic Effects", IEEE Trans. on Magn. MAG-4, 152-161 (1968)

/10/ H.J.Williams, F.G.Foster, and E.A.Wood "Observation of Magnetic Domains by the Kerr Effect", Phys.Rev.82, 119 (1951)

/11/ J.Kranz and A.Hubert "Die Möglichkeiten der Kerr-Technik zur Beobachtung magnetischer Bereiche", Z.f.angew.Phys. 15, 220-232 (1963)

/12/ J.Kranz, W.Drechsel "Über die Beobachtung von Weißschen Bereichen in polykristallinem Material durch die vergrößerte magneto-optische Kerrdrehung", Z.Phys.150, 632-639 (1958)

/13/ A.Hubert "Magnetic Domains", Springer-Verlag, to be published

/14/ C.A.Fowler and E.M.Fryer "Reduction of Photographic Noise", J.Opt.Soc.Amer. 44, 256 (1954)

/15/ C.A.Fowler,Jr, and E.M.Fryer " Magnetic Domains in Cobalt by the Longitudinal Kerr Effect",Phys.Rev. 95, 564 (1954)

/16/ A.Honda and K.Shirae "Domain Pattern Measurement Using CCD", IEEE Trans. on Magn., MAG-17, 3096-3098 (1981)

/17/ A.L.Baert, G.Marchal, G.Wilms, J.Haendle, W.Maaß and H.-D. Wolf "Computerangiographie - Intravenöse Arteriographie", Electromedica 2/81, 122-131

/18/ H.J.Queisser, W.Hartmann and W.Hagen "Real-Time X-Ray Topography: Defect Dynamics and Crystal Growth", J.Crystal Growth 52(2), 897-906 (1981)

/19/ K.-H.Hermann and D.Krahl "The Detection Quantum Efficiency of Electronic Image Recording Systems", J.of Microscopy 127 (1), 17-28 (1982)

/20/ S.J.Erasmus "Reduction of Noise in TV Rate Electron Mikroscope Images by Digital Filtering", J.of Microscopy 127 (1), 29-37 (1982)

/21/ K.Frank "Nahfokus-Bildwandler und -Bildverstärker", Feinwerktechnik & Meßtechnik 90 (2), 59-61 (1985)

/22/ W.Rave "Untersuchungen zur quantitativen Auswertung magnetooptischer Domänenbilder", Diplomarbeit Inst. WWVI, Universität Erlangen (1985)

/23/ M.Prell" Bau und Anwendung von Geräten zur Messung der Oberflächenmagnetisierung" Diplomarbeit Inst. WWVI, Universität Erlangen (1985)

/24/ Vacuumschmelze GmbH Hanau "Schnittbandkerne", Firmenschrift

/25/ M.Labrune, S.Hamzaoui, I.B.Puchalska, A.Hubert "180° Walls Dynamics in Uniaxial In-plane Magnetic Thin Films", J.Magn. Magn.Mat., to be published

/26/ G.Schröder "Technische Optik: Grundlagen und Anwendungen", Kamprath-Reihe Technik, Vogel-Buchverlag Würzburg (1984)

/27/ F.V.Tooley "The Handbook of Glass Manufacture", Books for Industry Inc. N.Y. (1974)

/28/ R.Bodenberger und A.Hubert "Zur Bestimmung der Blochwandenergie von einachsigen Ferromagneten", phys.stat.sol(a)44 K7-K11 (1977)

/29/ T.Nozawa, M.Yabumoto and Y.Matsuo "Studies of Domain Refining of Grain-Oriented Silicon Steel", Soft Magnetic Materials 7, Blackpool (1985) (Proceedings paper 3-1), to be published

/30/ W.Jillek, A.Hubert "The Influence of Mechanical Stresses on Losses and Domains of Oriented Transformer Steel", J.Magn. Magn.Mat.19, 365-368 (1980)

/31/ F.Schmidt,W.Rave and A.Hubert "Enhancement of Magneto-Optical Domain Observation by Digital Image Processing", IEEE Trans.Magn. MAG-21, 1596-1598 (1985)

/32/ D.J.Craik and R.S.Trebble "Ferromagnetism and Ferromagnetic Domains", North-Holland Publishing Company, Amsterdam (1965)

/33/ F.Schmidt, R.Schäfer, A.Hubert "Observations on Soft Magnetic Materials Using a Digitally Enhanced Kerr Microscope", Soft Magnetic Materials 7, Blackpool (1985) to be published

/34/ S.Yoshii et al. "High Density Recording Characteristics of Sputtered γ-Fe_2O_3 Thin Film Disks", J.Appl.Phys.53(3) 2556-2560 (1982)

/35/ S.Iwasaki and Y.Nakamura "An Analysis for the Magnetization Mode for High-Density Magnetic Recording", IEEE Trans.on Magn., MAG-13, 1272-1277 (1977)

/36/ S.-I.Iwasaki and K.Ouchi "Co-Cr Recording Films with Perpendicular Magnetic Anisotropy", IEEE Trans.Magn.MAG-14 849-851 (1978)

/37/ J.C.Lodder, T.Wielinga and J.Worst "RF-Sputtered Co-Cr Layers for Perpendicular Magnetic Recording; I: Structural Properties", Thin Solid Films 101, 61-73 (1983)

/38/ T.Wielinga and J.C.Lodder "Co-CrFilms for Perpendicular Recording", IEEE Trans.on Magn.,MAG-17, 3178-3180 (1981)

/39/ M.Ohkoshi, H.Toba, S.Honda and T.Kusuda "Electron Microscopy of CoCr Sputtered Films", J.Magn.Magn.Mat.35, 266-268 (1983)

/40/ P.J.Grundy, M.Ali and C.A.Faunce "Electron Microscopy of Co-Cr Films", IEEE Trans.Magn.MAG-20, 794-796 (1984)

/41/ H.Hoffmann, L.Kochanowsky, H.Mändl, K.Kastner, M.Mayr, W.D.Münz and K.Röll "Magnetic and Structural Properties of Magnetron Sputtered CoCr Thin Films", IEEE Trans.Magn.MAG-21, 1432-1434 (1985)

/42/ T.Wielinga, J.C.Lodder and J.Worst "Characteristics of RF-sputtered CoCr films", IEEE Trans.Magn.MAG-18, 1107-1109 (1982)

/43/ T.Wielinga "Investigations on perpendicular magnetic recording", Ph.D.Thesis, Techn. Univ. Twente (1983)

/44/ K.Ouchi and S.-I.Iwasaki "Perpendicular Magnetization Structure of Co-Cr Films", IEEE Trans.Magn.MAG-18, 1110-1112 (1982)

/45/ C.D.Wright, E.T.M.Lacey and P.J.Grundy "Optimization of the Magnetic Properties of CoCr Films for Perpendicular Recording", Proceedings Magnetic Materials for Applications, Grenoble June 1985 (J. Physique Coll.)

/46/ H.Hoffmann, communicated at the West European Meeting on Magnetic Recording, Bad Honnef Nov. 1985

/47/ O.Voegeli and F.J.Friedlaender "Flux Reversal in Thin Single-Crystal Films of Gadolinium Iron Garnet", IEEE Trans.Magn.MAG-7 711-714 (1971)

/48/ T.Suzuki "Perpendicular Magnetic Anisotropy of Fe-Nd Alloy Thin Films", J.Magn.Magn.Mat.15, 265-270 (1985)

/49/ G.A.Jones "Magnetic Contrast in the Scanning Electron Microscope", J.Magn.Magn.Mat. 8, 263-285 (1978)

Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. A. Hubert für das Überlassen des Themas, die stete Diskussionsbereitschaft und die jederzeit engagierte Betreuung sowie das Verständnis für persönliche Gegebenheiten

Herrn W. Habel, dessen Geschick und Schnelligkeit nicht nur bei der Entwicklung von Bildern sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben

Herrn J. Pfannenmüller, Herrn W. Rave , Herrn W. Grimm, Herrn M. Prell und Herrn L. Schmidt für die Mitarbeit beim Aufbau und bei der Stabilisierung des Systems

Herrn P. Olbricht, der bei kniffligen und dringenden feinmechanischen Problemen meist Zeit fand, mich zwischendurch einzuschieben

Herrn K. Bedner für die Erledigung anderer wichtiger mechanischer Arbeiten

Allen nicht namentlich erwähnten Mitgliedern der Magnetgruppe und auch des Instituts für das gute Arbeitsklima

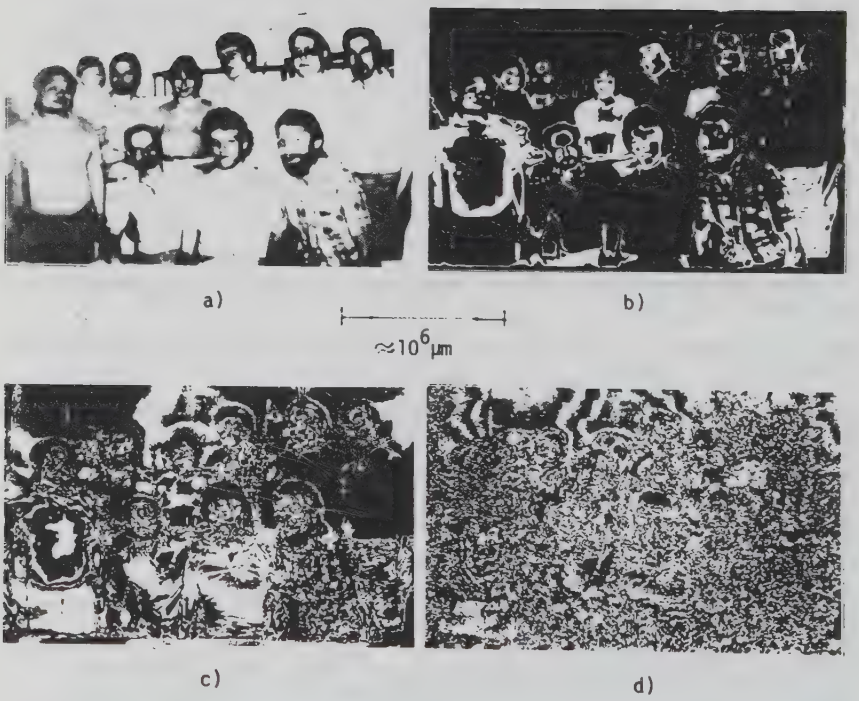
Herrn Dr. J. Haendle von der Siemens AG, UB Med, und Herrn Prof. H. J. Queisser vom Max-Planck-Institut in Stuttgart, die die Vorversuche an Ihren Bildverbeitungssystemen ermöglichten

Den Herren Dr. B. Hillenbrand, Dr. H. Schewe, Dr. H. Hülsing und Dr. G. Rupp vom Siemens-Forschungszentrum in Erlangen für das Interesse an der Untersuchung der CoCr-Schichten und die aktive Unterstützung der Arbeit

Herrn Dr. K. Röll von Leybold-Heraeus, Hanau, Herrn Prof. S.-I. Iwasaki, Sendai, Herrn Dr. E. Köster von BASF, Ludwigshafen, Herrn Prof. T. Suzuki, Sendai, und Herrn Dr. T. Nozawa von Nippon Steel für die zur Verfügung gestellten Proben

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die diese Arbeit unterstützt hat sowie der Siemens AG, Erlangen, und der Vacuumschmelze GmbH, Hanau, die mir übergangsweise finanziell unter die Arme gegriffen haben

Meiner Frau Susan, ohne deren immense Geduld und Verständnis die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre, sowie meinen Eltern und allen, die des öfteren als Babysitter Feuerwehr spielen durften.



Differenzbild der Arbeitsgruppe "Magnetische Werkstoffe" bei 100 Mittelungen und

verschieden ausgewählten Bitebenen (als Referenzbild diente der gleichmäßige Kontrast einer hellen Wand außerhalb des Fokus):

a) Normalbild (Bitebene 7-14) b) Bitebene 4-11

c) Bitebene 2-9 d) Bitebene 0-7

LEBENSLAUF

Persönliche Daten

geboren am	14.4.1957	in Erlangen
Eltern		Walter Schmidt, Dipl.-Ing. Ute Schmidt, geb. Schneider Hauswirtschaftsmeisterin
Geschwister		Gerhard Schmidt Ursula Schmidt
Familienstand		verheiratet mit Susan Schmidt, geb. Bloch Sekretärin
Kinder		Matthias Schmidt

Ausbildungsdaten

Schulausbildung	1963-1967	Grundschule in Erlangen
	1967-1975	Besuch des Ohm-Gymnasiums in Erlangen; Abschluß: Abitur
Hochschulstudium		Studium der Werkstoffwissenschaften an der Friedrich-Alexander-Universität in Erlangen
	1975-1976	2 Semester Grundstudium
	1976-1977	Unterbrechung durch Wehrdienst
	1977	Fortsetzung des Studiums
	Juli 1981	Diplomprüfungen
	11.81 - 8.82	Diplomarbeit: Optische Untersuchungen von Granatschichten
	9.82 - 3.86	wissenschaftlicher Angestellter bei Herrn Prof. Hubert am Institut WW VI

MIKROFILMSERVICE SELESCH DRUCK & VERLAG
Fliederweg 6 8521 Langensendelbach Telefon:09133/3338